

ISSN 2520-2227

ПАЁМИ ПОЛИТЕХНИКӢ

Бахши Таҳқиқотҳои муҳандисӣ

2 (74) 2026

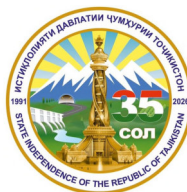


ПОЛИТЕХНИЧЕСКИЙ ВЕСТНИК
Серия: Инженерные исследования

POLYTECHNIC BULLETIN
Series: Engineering studies

ПАЁМИ ПОЛИТЕХНИКӢ

БАХШИ ТАҲҚИҚОТҲОИ МУҲАНДИСӢ



ISSN
2520-2227

2(74)
2026



МАҶАЛЛАИ ИЛМӢ – ТЕХНИКӢ

<http://vp-es.ttu.tj/> E-mail: vestnik_politech@ttu.tj

Published since January 2008

Маҷалла ба рӯйхати наирияхои тақризии КОА-и назди Президенти Ҷумҳурии Тоҷикистон, КОА-и назди Вазорати таҳсилоти олии, илм ва инноватсияҳои Ҷумҳурии Узбекистон ва равияи металлургияи он ба рӯйхати наирияхои тақризии КОА-и Федератсияи Россия ворид карда шудааст.

Журнал включен в перечень рецензируемых изданий ВАК при Президенте Республики Таджикистан, ВАК при Министерстве высшего образования, науки и инноваций Республики Узбекистан, а его металлургическое направление в перечень рецензируемых изданий ВАК Российской Федерации.

The journal is included in the list of peer-reviewed publications of the HAC under the President of the Republic of Tajikistan, the HAC under the Ministry of Higher Education, Science and Innovation of the Republic of Uzbekistan, and its metallurgical direction in the list of peer-reviewed publications of the HAC of the Russian Federation.

Маҷалла дар Вазорати фарҳанги Ҷумҳурии Тоҷикистон ба қайд гирифта шудааст.

№ 409/МҶ-97 аз 09 апрели соли 2025

Индекси обуна 77762

РАВИЯИ ИЛМИИ МАҶАЛЛА	НАУЧНОЕ НАПРАВЛЕНИЕ ЖУРНАЛА	SCIENTIFIC DIRECTION
05.14.00 Энергетика 05.16.00 Металлургия ва маводишиносӣ 05.17.00 Технологияи кимиявӣ 05.22.00 Нақлиёт 05.23.00 Сохтмон ва меъморӣ	05.14.00 Энергетика 05.16.00 Металлургия и материаловедение 05.17.00 Химическая технология 05.22.00 Транспорт 05.23.00 Строительство и архитектура	05.14.00 Energy 05.16.00 Metallurgy and materials science 05.17.00 Chemical technology 05.22.00 Transport 05.23.00 Construction and architecture

Муассис ва ношир	Учредитель и издатель	Founder and publisher
Донишгоҳи техникии Тоҷикистон ба номи академик М.С. Осимӣ	Таджикский технический университет имени академика М.С. Осими	Tajik Technical University named after academician M.S. Osimi
Ҳар семоҳа нашр мешавад	Издається ежеквартально	Published quarterly

Нишонӣ	Адрес редакции	Editorial office address
734042, г. Душанбе, хиёбони академикҳо Раҷабовҳо, 10А Тел.: (+992 37) 227-57-87	734042, г. Душанбе, проспект академиков Раджабовых, 10А Тел.: (+992 37) 227-57-87	734042, Dushanbe, Avenue of Academicians Radjabovs, 10A Tel.: (+992 37) 227-57-87

ПОЛИТЕХНИЧЕСКИЙ ВЕСТНИК

СЕРИЯ: ИНЖЕНЕРНЫЕ
ИССЛЕДОВАНИЯ

POLYTECHNIC BULLEEN

SERIES: ENGINEERING STUDIES

ҲАЙАТИ ТАҲРИРИЯ
САРМУҲАРРИР

Қ.Қ. ДАВЛАТЗОДА

д.и.и, профессор

Р.Т. АБДУЛЛОЗОДА

н.и.т., дотсент, муовини сармуҳаррир

Ш.А. БОЗОРОВ

н.и.т., дотсент, муовини сармуҳаррир

АЪЗОЁН

А.И. СИДОРОВ

д.и.т., профессор (Федератсияи Россия)

А.Г. ФИШОВ

д.и.т., профессор (Федератсияи Россия)

З.Ш. ЮЛДАШЕВ

д.и.т., дотсент

Л.С. ҚАСОБОВ

н.и.т., дотсент

А.Қ. ҚИРҒИЗОВ

н.и.т., и.в. дотсент

И.Н. ҒАНИЕВ

академики АМИТ, д.и.х., профессор

Ҳ.О. ОДИНАЗОДА

узви вобастаи АМИТ, д.и.т., профессор

Т.Қ. ЧУРАЕВ

д.и.х., профессор

М.М. ҲАҚДОД

узви вобастаи АМИТ, д.и.т., профессор

А.Б. БАДАЛОВ

узви вобастаи АМИТ, д.и.х., профессор

А.С. САЙДАЛИЗОДА

д.и.т., дотсент

В.В. СИЛЯНОВ

д.и.т., профессор (Федератсияи Россия)

Р.А. ДАВЛАТШОЕВ

н.и.т., дотсент

М.Ю. ЮНУСОВ

н.и.т., и.в. дотсент

Р. САЛОМЗОДА

н.и.т., дотсент

М.А. АБДУЛЛО

н.и.т., дотсент

А.Қ. РАҲМОНЗОДА

н.и.т., дотсент

Қ.Н. НИЗОМОВ

узви вобастаи АМИТ, д.и.т., профессор

И. ҚАЛАНДАРБЕКОВ

д.и.т., профессор

А. Г. ГИЯСОВ

д.и.т., профессор (Федератсияи Россия)

Н.Н. ҲАСАНОВ

доктори меъморӣ, и.в. профессор

Р.С. МУҚИМОВ

доктори меъморӣ, профессор

Қ.Ҳ. САИДЗОДА

д.и.т., профессор

Р.Ҳ. РАСУЛОВ

д.и.т., профессор (Ҷумҳурии Ўзбекистон)

Н.М. ҲАСАНОВ

д.и.т., дотсент

РЕДАКЦИОННАЯ КОЛЛЕГИЯ
ГЛАВНЫЙ РЕДАКТОР

К.К. ДАВЛАТЗОДА

д.э.н., профессор

Р.Т. АБДУЛЛОЗОДА

к.т.н., доцент, зам. главного редактора

Ш.А. БОЗОРОВ

к.т.н., доцент, зам. главного редактора

ЧЛЕНЫ РЕДКОЛЛЕГИИ

А.И. СИДОРОВ

д.т.н., профессор (Российская Федерация)

А.Г. ФИШОВ

д.т.н., профессор (Российская Федерация)

З.Ш. ЮЛДАШЕВ

д.т.н., доцент

Л.С. КАСОБОВ

к.т.н., доцент

А.К. КИРГИЗОВ

к.т.н., и.о. доцента

И.Н. ГАНИЕВ

академик АН РТ, д.х.н. профессор

Х.О. ОДИНАЗОДА

член-корр. АН РТ, д.т.н., профессор

Т.Д. ДЖУРАЕВ

д.х.н., профессор

М.М. ҲАҚДОД

член-корр. АН РТ, д.т.н., профессор

А.Б. БАДАЛОВ

член-корр. АН РТ, д.х.н., профессор

А.С. САИДАЛИЗОДА

д.т.н., доцент

В.В. СИЛЯНОВ

д.т.н., профессор (Российская Федерация)

Р.А. ДАВЛАТШОЕВ

к.т.н., доцент

М.Ю. ЮНУСОВ

к.т.н., и.о. доцента

Р. САЛОМЗОДА

к.т.н., доцент

М.А. АБДУЛЛО

к.т.н., доцент

А.ДЖ. РАҲМОНЗОДА

к.т.н., доцент

Д.Н. НИЗОМОВ

член-корр. АН РТ, д.т.н., профессор

И. ҚАЛАНДАРБЕКОВ

д.т.н., профессор

А. Г. ГИЯСОВ

д.т.н., профессор (Российская Федерация)

Н.Н. ҲАСАНОВ

доктор архитектуры, и.о. профессора

Р.С. МУКИМОВ

доктор архитектуры, профессор

Дж.Х. САИДЗОДА

д.т.н., профессор

Р.Ҳ. РАСУЛОВ

д.т.н., профессор (Республика Узбекистан)

Н.М. ҲАСАНОВ

д.т.н., доцент

Материалы публикуются в авторской редакции, авторы опубликованных работ несут ответственность за оригинальность и научно-теоретический уровень публикуемого материала, точность приведенных фактов, цитат, статистических данных и прочих сведений. Редакция не несет ответственность за достоверность информации, приводимой авторами.

Автор, направляя рукопись в Редакцию, принимает личную ответственность за оригинальность исследования, поручает Редакции обнародовать произведение посредством его опубликования в печати.

МУНДАРИҶА – ОГЛАВЛЕНИЕ

ЭНЕРГЕТИКА - ENERGY	6
<i><u>ОЦЕНКА ДОСТОВЕРНОСТИ ФУНКЦИОНИРОВАНИЯ ЗАЩИТ</u></i>	<i><u>6</u></i>
<i><u>ОТ ОДНОФАЗНЫХ ЗАМЫКАНИЙ НА ЗЕМЛЮ В ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ СЕТЯХ 6-10 кВ</u></i>	<i><u>6</u></i>
Р.Т. Абдуллозода	6
<i><u>АНАЛИЗ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ РЕЖИМОВ СЕТИ 110 кВ ДАРХАН — БУГАНТ</u></i>	<i><u>13</u></i>
¹ У. Бумцэнд, ² Дж.С. Ахъёев, ¹ И. Хишигбаяр, ¹ А. Далай	13
<i><u>ОПТИМИЗАЦИЯ ГИБРИДНОЙ СИСТЕМЫ ВОЗОБНОВЛЯЕМОЙ ЭНЕРГИИ</u></i>	<i><u>22</u></i>
<i><u>С НАКОПИТЕЛЯМИ ЭНЕРГИИ</u></i>	<i><u>22</u></i>
А.К. Киргизов	22
<i><u>ПРИМЕНЕНИЕ МЕТАЭВРИСТИЧЕСКИХ АЛГОРИТМОВ ДЛЯ МНОГОКРИТЕРИАЛЬНОЙ ОПТИМИЗАЦИИ РАЗМЕЩЕНИЯ КОМПЕНСИРУЮЩИХ УСТРОЙСТВ С УЧЕТОМ РИСКОВ ВОЗНИКНОВЕНИЯ РЕЗОНАНСА</u></i>	<i><u>28</u></i>
¹ З.Х. Хабибуллозода, ² Ш.Дж. Джуразода, ¹ С.Т. Исмоилов, ¹ М.К. Джаборов	28
<i><u>ОБОСНОВАНИЕ ВЫБОРА ОПТИМАЛЬНОГО МЕСТА УСТАНОВКИ МГЭС НА ИРРИГАЦИОННЫХ КАНАЛАХ</u></i>	<i><u>42</u></i>
Ш.Х. Пирова, Ф.М. Рахимзода (Рахимов)	42
<i><u>АНАЛИЗ РАЗВИТИЯ УТОЧНЕННЫХ МЕТОДИК РАСЧЕТА ТОКОВ КОРОТКОГО ЗАМЫКАНИЯ С УЧЕТОМ КОМПЛЕКСА ВЛИЯЮЩИХ ФАКТОРОВ</u></i>	<i><u>47</u></i>
А.Г. Каюмов, А.Р. Амонуллоев, М.К. Джаборов, Д.С. Аминов, Б.И. Косимов	47
<i><u>ВЛИЯНИЕ ИЗМЕНЕНИЯ МОЩНОСТИ НАГРУЗКИ НА РАСПРЕДЕЛЕНИЕ АКТИВНОЙ МОЩНОСТИ МЕЖДУ ВЕТРОЭЛЕКТРИЧЕСКИМ И ДИЗЕЛЬ-ГЕНЕРАТОРОМ</u></i>	<i><u>60</u></i>
Р.А. Джалилов	60
<i><u>ОПТИМИЗАЦИЯ РЕЖИМОВ РАБОТЫ ГИБРИДНОЙ ЭНЕРГЕТИЧЕСКОЙ СИСТЕМЫ МУРГАБСКОГО РАЙОНА РЕСПУБЛИКИ ТАДЖИКИСТАН</u></i>	<i><u>65</u></i>
Р.Х. Диёрзода, Б.Н. Шарифов, Ф.Н. Кувватов	65
<i><u>АНАЛИЗ ТЕХНИКО-ЭКОНОМИЧЕСКОЙ ЦЕЛЕСООБРАЗНОСТИ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ СТАЦИОНАРНОГО ДЕЛЕНИЯ СЕТИ ДЛЯ ОГРАНИЧЕНИЯ УРОВНЕЙ ТОКОВ КОРОТКОГО ЗАМЫКАНИЯ</u></i>	<i><u>78</u></i>
Дж.Б. Рахимзода, Н.Р. Мукимова, Ю.М. Умарализода, Э.К. Шарипов	78
<i><u>КОМПЛЕКС ГИДРОТЕХНИЧЕСКИХ СООРУЖЕНИЙ ДЛЯ ОЧИСТКИ СТОКА РЕКИ ОТ НАНОСОВ И ИХ ИСПОЛЬЗОВАНИЕ В ГОРНОЙ ПРОМЫШЛЕННОСТИ</u></i>	<i><u>90</u></i>
К.Л. Иноятова, А.А. Гулахмадзода	90
<i><u>ИНТЕГРАЦИЯ СОЛНЕЧНЫХ ЭЛЕКТРОСТАНЦИЙ В СИСТЕМУ ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЯ БАЗОВЫХ СТАНЦИЙ СОТОВЫХ ОПЕРАТОРОВ: СОВРЕМЕННОЕ СОСТОЯНИЕ И ПЕРСПЕКТИВЫ</u></i>	<i><u>100</u></i>
Дж.Х. Худжасаидов	100
МЕТАЛЛУРГИЯ ВА МАВОДШИНОСӢ - МЕТАЛЛУРГИЯ И МАТЕРИАЛОВЕДЕНИЕ - METALLURGY AND MATERIALS SCIENCE.....	108
<i><u>О КАТАЛИТИЧЕСКОЙ АКТИВНОСТИ ЭЛЕМЕНТОВ ПЕРИОДИЧЕСКОЙ СИСТЕМЫ Д.И. МЕНДЕЛЕЕВА</u></i>	<i><u>108</u></i>
Т.Д. Джураев, Э.Р. Газизова, М.А. Иззатуллоев	108
<i><u>ИССЛЕДОВАНИЕ ТЕМПЕРАТУРНОГО ФАКТОРА ПРИ ПОСТАДИЙНОЙ ЭКСТРАКЦИИ Fe(III) И Zn(II) ИЗ ХЛОРИДНЫХ РАСТВОРОВ</u></i>	<i><u>114</u></i>
¹ Д.Л. Илизаров, ¹ Н.Б. Кокоева, ² Н.В. Мартюшев	114
<i><u>ИССЛЕДОВАНИЕ И ПОСТРОЕНИЕ ДИАГРАММЫ ТРОЙНОЙ СИСТЕМЫ Al-Li-Ce</u></i>	<i><u>125</u></i>
Н.И. Ганиева, Х.О. Одиназода, С.С. Раджабалиев, А.Д. Шамсиддинов	125
<i><u>ОПТИМИЗАЦИЯ ОЧИСТКИ НИКЕЛЕВОГО ЭЛЕКТРОЛИТА ОТ ЖЕЛЕЗА СМЕСЬЮ ОЛЕИНОВОЙ КИСЛОТЫ И ТРИЭТАНОЛАМИНА</u></i>	<i><u>132</u></i>
¹ Д.Л. Илизаров, ¹ Н.Б. Кокоева, ² Н.В. Мартюшев	132

ВЛИЯНИЕ ОСАЖДЕНИЯ Cu НА ШЕРОХОВАТОСТЬ ПОВЕРХНОСТИ И КОЭФФИЦИЕНТ ТРЕНИЯ Al_2O_3.....	143
¹ М.У. Хайдаров, ² Н.Н.Черенда, ¹ Э.Э. Окилов	143
АНОДНОЕ ПОВЕДЕНИЕ ОЛОВЯННОГО БАББИТА $SnSb_{11}Cu_6$ С ЛИТИЕМ В СРЕДЕ РАСТВОРА $NaCl$.....	150
¹ И.Н. Ганиев, ² С.С. Саидов, ¹ М.М. Махмадизода, ³ Ш.Ш. Окилов., ⁴ И.Ш. Идиев.....	150
ТАЪСИРИ ИЛОВАИ ТАЛЛИЙ БА МИКРОСОХТОР ВА ХОСИЯТҲОИ МЕХАНИКИИ БАББИТИ ҚАЛЪАҒӢ $B83$	159
И.Н. Ганиев, Х.Д. Музафаров, Р.Д. Исмонзода, Х.М. Хочаназаров	159
КЛАССИФИКАЦИЯ ДИАГРАММ ФАЗОВОГО РАВНОВЕСИЯ СПЛАВОВ С НЕСМЕШИВАЕМОСТЬЮ КОМПОНЕНТОВ И ПЕРСПЕКТИВА ИХ ПРИМЕНЕНИЯ	166
¹ Т.Д. Джуроев, ² К.Б. Нуров, ¹ Э.Р. Газизова, ¹ М.Т. Тошев	166
ТЕХНОЛОГИИ КИМИЁӢ - ХИМИЧЕСКАЯ ТЕХНОЛОГИЯ - CHEMICAL TECHNOLOGY	176
СРАВНИТЕЛЬНЫЙ АНАЛИЗ ТЕРМИЧЕСКОЙ УСТОЙЧИВОСТИ КРИСТАЛЛОГИДРАТОВ ТОРИЯ (IV) И УРАНИЛА	176
¹ Ф.Д. Саломов, ² М.С. Исломова, ² М.А. Бадалова, ² Г.К. Рузматова	176
ИСПЫТАНИЯ ИЗМЕЛЬЧЁННОЙ МИНЕРАЛЬНОЙ СМЕСИ МУСКОВИТА МЕСТОРОЖДЕНИЯ КУРГОВАТ ТАДЖИКИСТАНА	184
¹ Ф.Б. Мирзозода, ² Азим Иброхим	184
КАТАЛИТИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА ЖЕЛЕЗНЫХ ОКСИДНЫХ СИСТЕМ В ГЕТЕРОГЕННОМ СИНТЕЗЕ АММИАКА	189
¹ З.Х. Гайбуллаева, ² Т.Х. Гадоев	189
КРИСТАЛЛОХИМИЯ И МАГНИТНЫЕ СВОЙСТВА ТВЕРДЫХ РАСТВОРОВ АНТИМОНИДОВ СОСТАВА $GdSb_3 - LnSb_3$ ($Ln = Tb, Dy$)	196
¹ В.Д. Абулхаев, ² Х.Х. Назарзода, ³ Х.А. Рахимов	196
КОМПЬЮТЕРНОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ ИССЛЕДОВАНИЯ ТЕМПЕРАТУРНОЙ ЗАВИСИМОСТИ КОЭФФИЦИЕНТОВ ВЯЗКОСТИ И ПЛОТНОСТИ 1,4 -БЕНЗОДИОКСАНА	203
¹ М.Б. Акрамов, ² М. Бахтовар, ² И.О. Мирзода	203
КОМПЛЕКСООБРАЗОВАНИЕ СЕРЕБРА (I) С 2-МЕРКАПТОИМИДАЗОЛОМ В ВОДНО-ДИМЕТИЛФОРМАМИДНЫХ РАСТВОРАХ.....	210
А.С. Содатдинова, Б.С. Сурайё, С.И. Сафаров, К.С. Мабаткадамзода, С.М. Сафармамадзода.	210
НАҚЛИЁТ - ТРАНСПОРТ - TRANSPORT.....	217
ОПТИМИЗАЦИЯ ЗИМНЕГО СОДЕРЖАНИЯ ГОРНЫХ АВТОМОБИЛЬНЫХ ДОРОГ ПРИ ОГРАНИЧЕННЫХ РЕСУРСАХ..	217
С.Б. Мирзозода	217
МЕТОД ОЦЕНКИ ЭФФЕКТИВНОСТИ ГРУЗОВЫХ АВТОМОБИЛЕЙ	226
¹ С.С. Сайдуллозода, ¹ Б.Ж. Мажитов, ² К.Т. Мамбеталин	226
РОЛЬ НАУЧНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ В ФОРМИРОВАНИИ	237
СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ ДОРОЖНЫМИ АКТИВАМИ (СУДА).....	237
С.Б. Мирзозода	237
СОХТМОН ВА МЕЪМОРӢ - СТРОИТЕЛЬСТВО И АРХИТЕКТУРА - CONSTRUCTION AND ARCHITECTURE.....	248
ОЦЕНКА ТЕПЛОЗАЩИТНЫХ ХАРАКТЕРИСТИК НАРУЖНЫХ ОГРАЖДАЮЩИХ КОНСТРУКЦИЙ ГРАЖДАНСКИХ ЗДАНИЙ.....	248
Н.М. Каримов, Д.Ф. Каландаров, М.Х. Шарипов	248
ВЛИЯНИЕ ЧЕТЫРЕХКОМПОНЕНТНЫХ ЦЕМЕНТОВ НА ФИЗИКО-МЕХАНИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА БЕТОНА	256
А.А. Акрамов	256
МОДЕЛИРОВАНИЕ И ПРИНЦИПЫ ТЕОРИИ ПОДОБИЯ.....	266
¹ Д.Н. Низомов, ² И.К. Каландарбеков, ² И.И. Каландарзода, ² Д.Д. Джурахонзода, ² А. Амруллох ..	266
ОЦЕНКА ТЕКУЩЕЙ СИТУАЦИИ В СФЕРЕ ВОДОСНАБЖЕНИЯ И ВОДООТВЕДЕНИЯ В РЕСПУБЛИКЕ ТАДЖИКИСТАН.	272

М.Б. Бердизода, А.Ю. Норматов	272
<u>НАУЧНО-ПРАКТИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ УПРАВЛЕНИЯ ПРОЧНОСТНЫМИ СВОЙСТВАМИ ЗОЛОСОДЕРЖАЩИХ БЕТОНОВ И ОЦЕНКА ИХ ТЕХНИКО-ЭКОНОМИЧЕСКОЙ ЭФФЕКТИВНОСТИ.....</u>	<u>281</u>
А.М. Абдуганиев, А.А.Акрамов, М.Р. Джуракулов	281
<u>ОСОБЕННОСТИ АКУСТИЧЕСКОЙ РЕКОНСТРУКЦИИ ОТКРЫТОГО ТЕАТРА</u>	<u>292</u>
А.Р. Фазилов.....	292
<u>ВОПРОСЫ ТРАНСФОРМАЦИИ АРХИТЕКТУРНОЙ СРЕДЫ ГОРОДОВ ТАДЖИКИСТАНА</u>	<u>300</u>
Ш.И. Рахматуллозода, М.Р. Фиёси, И.И. Гиёсов	300
<u>ВЛИЯНИЕ ВЫСОКООСНОВНЫХ И КИСЛЫХ ЗОЛ–УНОСА НА КОМПОЗИЦИОННОМ ВЯЖУЩЕМ И АСПЕКТ СВОБОДНОГО ОКСИДА КАЛЬЦИЯ</u>	<u>307</u>
И.С. Муминов, А.А. Акрамов, Г.А. Абдурахманова	307
<u>СОВРЕМЕННЫЕ МОДЕЛИ ПРЕДОСТАВЛЕНИЯ УСЛУГ ВОДОСНАБЖЕНИЯ</u>	<u>318</u>
<u>И ВОДООТВЕДЕНИЯ РЕСПУБЛИКИ ТАДЖИКИСТАН.....</u>	<u>318</u>
М.Б. Бердизода, А.Ю. Норматов	318

УДК: 621.391

DOI: 10.65599/ENG6047

ОЦЕНКА ДОСТОВЕРНОСТИ ФУНКЦИОНИРОВАНИЯ ЗАЩИТ ОТ ОДНОФАЗНЫХ ЗАМЫКАНИЙ НА ЗЕМЛЮ В ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ СЕТЯХ 6-10 кВ

Р.Т. Абдуллозода

Таджикский технический университет имени академика М.С. Осими, г. Душанбе, Республика Таджикистан

Работа посвящена оценке показателей достоверности функционирования релейной защиты от однофазных замыканий на землю в электрических сетях напряжением 6–10 кВ. В качестве объекта исследования выбраны отходящие линии подстанций «Мироб» 35/6 кВ и «Хамадони» 35/10 кВ, находящиеся на балансе Филиала ОАО «Распределительные электрические сети» города Куляба. Исходные пятилетние статистические данные получены из рукописных документов – оперативных журналов указанных подстанций. Достоверность данных подтверждается тем, что журналы прошиты, пронумерованы и заверены подписями ответственных лиц и печатью организации. При этом определены показатели: число правильных срабатываний, общее число однофазных замыканий на землю, количество ложных срабатываний и число несрабатываний защиты. В ходе исследования с использованием действующих методик выполнен расчёт достоверности правильного и ошибочного функционирования, а также вероятности безотказной работы рассматриваемых защит. По результатам анализа выявлены наименее надёжные защиты, а также защиты с наибольшей вероятностью безотказной работы.

Ключевые слова: ОЗЗ, селективность, надёжность, вероятность безотказной работы, ложные срабатывания.

АРЗЁБИИ КОРИ ДУРУСТИ ҲИМОЯҶО АЗ РАСИШ БА ЗАМИН ДАР ШАБАКАҶОИ БАҶҶИИ 6-10 кВ

Р.Т. Абдуллозода

Донишгоҳи техникии Тоҷикистон ба номи академик М.С. Осимӣ, ш. Душанбе, Ҷумҳурии Тоҷикистон

Мақола ба арзёбии нишондиҳандаҳои эътимоднокии кори ҳимояи релей аз расишҳои якфаза ба замин дар шабакаҳои баҷҷии шиддати 6–10 кВ бахшида шудааст. Ҳамчун объекти тадқиқот хатҳои баромади зеристгоҳҳои «Мироб» 35/6 кВ ва «Ҳамадонӣ» 35/10 кВ интихоб гардидаанд, ки дар тавозуни Филиали ҚСҚ «Шабакаҳои баҷҷии тақсимотӣ»-и шаҳри Кӯлоб қарор доранд. Маълумоти омории панҷсола аз ҳуҷҷатҳои дастанвисшуда - журналҳои амалиёти зеристгоҳҳои мазкур гирифта шудааст. Дурусти маълумот бо он тасдиқ мегардад, ки журналҳо дӯхта, рақамгузорӣ шуда ва бо имзои шахсони масъул ва мӯҳри муассиса тасдиқ шудаанд. Дар ин замина нишондиҳандаҳои зерин муайян карда шуданд: миқдори кори дурусти ҳимояҳо, миқдори умумии расишҳои якфаза ба замин, миқдори бақордариҳои иштибоҳӣ ва ҳолатҳои азқормонии ҳимояҳо. Дар ҷараёни тадқиқот бо истифода аз методикаҳои амалкунанда ҳисобкунии эътимоднокии кори дуруст ва нодуруст, инчунин эҳтимолияти кори ҳимояҳои баррасишаванда иҷро гардид. Аз рӯи натиҷаҳои таҳлил ҳимояҳои дорои эҳтимолияти кам, инчунин ҳимояҳое, ки эҳтимолияти баланди кори устувор доранд, муайян карда шуданд.

Калидвожаҳо: расиши якфаза ба замин, интихобият, эҳтимолият, эҳтимолияти азқормонӣ, бақордариҳои иштибоҳии ҳимоя.

ASSESSMENT OF THE RELIABILITY OF EARTH FAULT PROTECTION IN 6-10 kV ELECTRICAL NETWORKS

R. Abdullozoda

Tajik Technical University named after Academician M.S. Osimi, Dushanbe, Republic of Tajikistan

The paper is devoted to the assessment of reliability indicators of relay protection operation against single-phase-to-ground faults in 6–10 kV electrical networks. The object of the study comprises outgoing feeders of the “Mirob” 35/6 kV and “Hamadoni” 35/10 kV substations, which are operated by the branch of JSC “Distribution Electric Networks” in the city of Kulob. The initial five-year statistical data were obtained from handwritten documents, namely operational logs of the considered substations. The reliability of the data is confirmed by the fact that the logs are bound, numbered, and certified by the signatures of responsible personnel and the official seal of the organization. The following indicators were determined: the number of correct operations, the total number of single-phase-to-ground faults, the number of false operations, and the number of protection failures. Using established methodologies, the reliability of correct and incorrect operation, as well as the probability of failure-free operation of the considered protections, were calculated. The analysis identified the least reliable protections as well as those with the highest probability of failure-free operation.

Keywords: earth faults, selectivity, reliability, probability of failure-free operation, false tripping.

Введение

Электрические сети напряжением 6–10 кВ, как правило, относятся к сетям с изолированной нейтралью. В таких сетях при замыкании одной фазы на землю возникает однофазное замыкание на землю (ОЗЗ), которое не сопровождается существенным возрастанием тока. Это объясняется тем,

что нейтраль источника питания либо не соединена с землёй, либо соединена через большое активное или индуктивное сопротивление.

Однако длительная работа сети в режиме однофазного замыкания на землю может привести к возникновению двойного замыкания на землю. При этом величина тока повреждения, в зависимости от расстояния между точками замыкания, может приближаться к току двухфазного короткого замыкания. Это связано с тем, что при ОЗЗ напряжение повреждённой фазы относительно земли приближается к нулю, а в двух неповреждённых фазах напряжение относительно земли возрастает в $\sqrt{3}$ раза. В результате изоляция этих фаз оказывается под воздействием линейного напряжения, что приводит к её ускоренному старению и повышает вероятность дальнейших повреждений.

Как показывает практика, наиболее часто возникающими аварийными ситуациями являются однофазные замыкания на землю, которые зависят от множества факторов. В настоящее время для защиты линий электропередачи (ЛЭП) от ОЗЗ применяются различные виды защит [1].

К наиболее распространённым видам защит относятся максимальная токовая защита нулевой последовательности, направленные защиты, а также специализированные устройства защиты от замыканий на землю, основанные на фиксации токов нулевой последовательности. Значение тока однофазного замыкания на землю в сетях с изолированной или компенсированной нейтралью, как правило, невелико. Однако фильтр токов нулевой последовательности требует применения специальных электромеханических или микропроцессорных устройств, что затрудняет процесс обнаружения повреждений и обеспечение селективности действия устройств релейной защиты. Применение дополнительных устройств непосредственно влияет на чувствительность и быстродействие защит и приводит к возрастанию вероятности как несрабатывания, так и ложных действий [2, 6].

В процессе эксплуатации под воздействием различных факторов, в том числе климатических, значение тока однофазного замыкания на землю может изменяться в широких пределах. Кроме того, конфигурация электрической сети, а также число параллельных отходящих линий оказывают существенное влияние на величину тока ОЗЗ. Указанные факторы существенно затрудняют отстройку устройств релейной защиты и автоматики.

Учитывая вышеуказанные факторы, оценка достоверности функционирования устройств защиты от однофазных замыканий на землю в сетях напряжением 6–10 кВ является актуальной научно-технической задачей. Достоверность функционирования устройств релейной защиты определяется их способностью правильно реагировать на аварийные режимы и исключать ложные срабатывания во всех режимах работы электрической сети. Недостаточная достоверность функционирования защит может привести к развитию аварий, что существенно снижает надёжность электрических сетей.

Исходя из этого, в данной работе ключевое значение имеет применение методов количественной оценки достоверности функционирования устройств релейной защиты от однофазных замыканий на землю на основе статистических данных их эксплуатации. Использование вероятностных показателей, характеризующих функционирование устройств релейной защиты, позволяет оценить их работоспособность по критериям селективности, чувствительности, надёжности и быстродействия.

Метод оценки достоверности защиты от ОЗЗ

Согласно [7], основными показателями достоверности функционирования систем релейной защиты являются: достоверность правильного функционирования $D_{\text{пф}}$, достоверность ошибочного функционирования $D_{\text{оф}}$ и вероятность безотказной работы P_6 . В рамках настоящего исследования рассматривается оценка достоверности функционирования защиты линий электропередачи напряжением 6–10 кВ от однофазных замыканий на землю.

При этом для определения показателя $D_{\text{пф}}$ учитываются наблюдаемое число правильных срабатываний защиты $N_{\text{пф}}$ и общее число ОЗЗ $N_{\text{ОЗЗ}}$, соответствующее количеству однофазных замыканий на землю за рассматриваемый период. Таким образом, достоверность правильного функционирования защиты от ОЗЗ определяется по приведённой ниже формуле (1).

$$D_{\text{пф}} = \frac{N_{\text{пф}}}{N_{\text{ОЗЗ}}} \quad (1)$$

Следует отметить, что данный показатель характеризует степень корректности срабатывания защиты от однофазных замыканий на землю, то есть позволяет оценить, насколько точно защита реагирует на реальные аварийные ситуации.

Наряду с этим вторым показателем достоверности является $D_{\text{оф}}$, который характеризует вероятность ошибочного функционирования защиты. Данный показатель используется для оценки неправильных срабатываний защиты от ОЗЗ при подаче ложных сигналов от первичных измерительных преобразователей в нормальном режиме работы первичной цепи.

При этом учитываются число ложных срабатываний (ошибочного функционирования) защиты $N_{\text{оф}}$ и число ненормальных режимов (с учетом других видов повреждений) $N_{\text{н}}$. Таким образом, данный показатель позволяет количественно оценить вероятность ошибочного срабатывания защиты от ОЗЗ.

$$D_{\text{оф}} = \frac{N_{\text{оф}}}{N_{\text{н}}} \quad (2)$$

В дополнение к рассмотренным показателям третьим показателем достоверности является вероятность безотказной работы P_6 , которая характеризует способность защиты от ОЗЗ надёжно функционировать в аварийных режимах работы электрической сети.

При этом для её определения учитывается количество несрабатываний защиты $N_{\text{нс}}$ при возникновении аварийных режимов. Следовательно, данный показатель позволяет оценить надёжность функционирования защиты от ОЗЗ в условиях реальных повреждений сети.

$$P_6 = \frac{N_{\text{пф}}}{N_{\text{пф}} + N_{\text{нс}}} \quad (3)$$

Таким образом, использование вышеизложенной методики позволяет оценивать достоверность функционирования защиты от ОЗЗ. При этом для получения корректных результатов необходимо применять статистические данные, характеризующие поведение рассматриваемой защиты на исследуемых энергетических объектах.

Результаты статистического анализа функционирования защиты от ОЗЗ

Для анализа функционирования защиты от однофазных замыканий на землю была использована пятилетняя статистика (2021–2025 гг.), отражающая основные показатели достоверности функционирования защиты на отходящих линиях подстанций «Мироб» 35/6 кВ и «Хамандони» 35/10 кВ, находящихся на балансе Филиала ОАО «Распределительные электрические сети» города Куляба. При этом достоверность используемой статистической информации обеспечивается тем, что исходные данные получены из оперативных журналов указанных подстанций и подтверждены подписями ответственных лиц, а также печатями соответствующих организаций [8, 9]. Следует отметить, что отходящие линии данных подстанций оснащены различными видами электромеханической релейной защиты и автоматики; в частности, для защиты от однофазных замыканий на землю применяются защиты от ОЗЗ, токовая направленная защита (ТНП) и максимальная токовая защита нулевой последовательности. Особенности схем подключения, а также основные параметры первичных измерительных преобразователей и обмоток реле, используемых в указанных защитах, приведены в работе [10].

Для подстанции «Мироб» 35/6 кВ и ПС «Хамандони» 35/10 кВ были определены следующие статистические показатели: общее число аварийных случаев $N_{\text{ОЗЗ}}$ а также число правильных срабатываний защиты $N_{\text{пф}}$ за рассматриваемый период, значение которых приведены в табл. 1. Наряду с этим проведён анализ ошибочного функционирования защиты, характеризуемого числом ложных срабатываний $N_{\text{оф}}$, возникающих при ненормальных режимах, общее количество которых обозначено как $N_{\text{н}}$.

Таблица 1 – Основные характеристики защит рассматриваемых линий за период 2021–2025 гг.
 Table 1 – Main Characteristics of the Protection Systems of the Studied Lines for the Period 2021–2025

№ п/п	Номер ячейки (отходящая линия)	Число правильных срабатываний защиты от ОЗЗ, $N_{пф}$	Общее число ОЗЗ, $N_{озз}$	Число ложных срабатываний (ошибочного функционирования) защиты, $N_{оф}$	Число ненормальных режимов (с учетом других видов повреждений), $N_{н}$	Количество несрабатываний защиты, $N_{нс}$
ПС «Мироб» 35/6 кВ						
1.	ЛМР-1 (ВЛ)	17	21	3	23	4
	ЛМР-2 (ВЛ)	12	13	1	18	1
	ЛМР-5 (ВЛ)	9	9	0	13	0
	ЛМР-11(ВЛ)	10	12	1	16	2
ПС «Хамандони» 35/10 кВ						
2.	ЛХМ-3 (ВЛ)	16	24	4	30	8
	ЛХМ-4 (ВЛ)	26	36	6	47	10
	ЛХМ-6 (ВЛ)	29	35	3	48	6
	ЛХМ-9 (ВЛ)	52	65	5	78	13
	ЛХМ-10 (ВЛ)	16	24	3	28	8
	ЛХМ-12 (ВЛ)	66	76	7	92	10
	ЛХМ-16 (ВЛ)	41	49	3	64	8
	ЛХМ-18 (ВЛ)	8	14	3	18	6
	ЛХМ-19 (ВЛ)	29	37	4	47	8
	ЛХМ-20 (ВЛ)	2	3	0	4	1
	ЛХМ-21 (ВЛ)	1	1	0	1	0

Обработка полученных данных на основе вышеизложенного метода позволяет оценить основные показатели достоверности функционирования защит от ОЗЗ, применяемых на исследуемых подстанциях, а также определить вероятность их безотказной работы. На рис. 1 приведено сравнение числа правильных срабатываний защиты от ОЗЗ с общим числом ОЗЗ на отходящих линиях рассматриваемых подстанций.

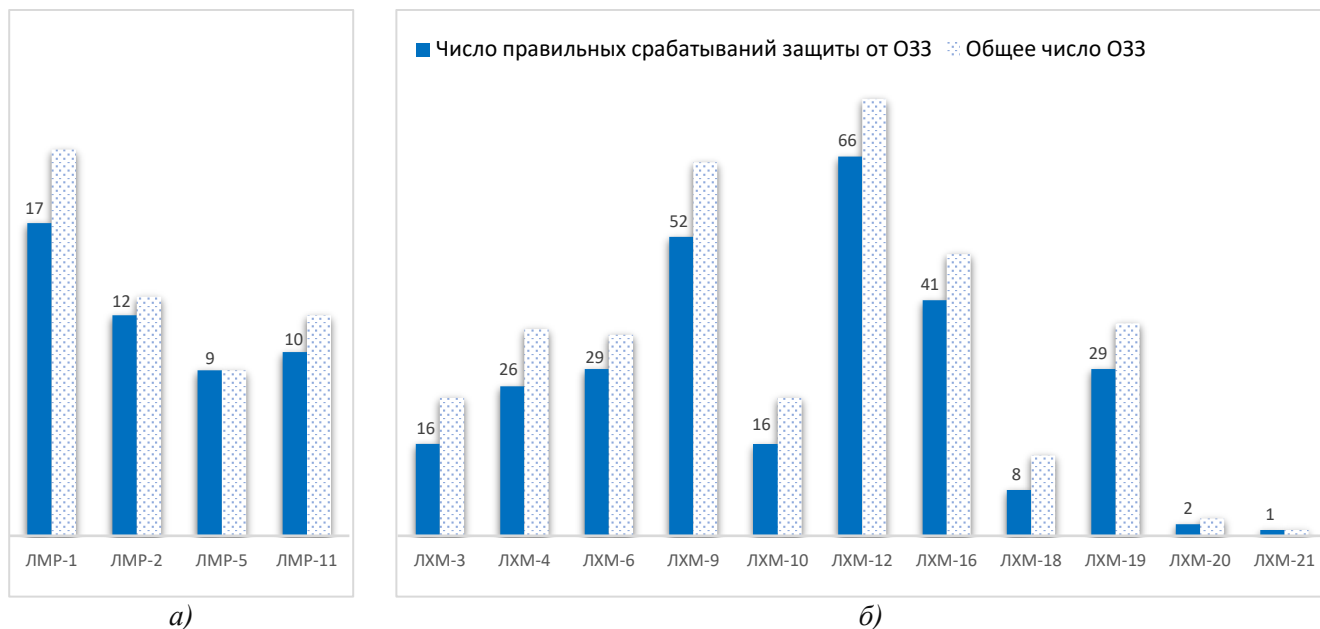


Рисунок 1 – Сравнение числа правильных срабатываний защиты от ОЗЗ с общим числом ОЗЗ: а) ПС «Мироб» 35/6 кВ; б) ПС «Хамандони» 35/10 кВ.

Figure 1 – Comparison of the Number of Correct Single-Phase Ground Fault Protection Operations with the Total Number of Single-Phase Ground Faults: (a) Mirob 35/6 kV Substation; (b) Hamadoni 35/10 kV Substation.

С использованием уравнений (1–3) выполнен расчёт показателей $D_{\text{пф}}$, $D_{\text{оф}}$ и P_6 для защиты, установленной на отходящей линии ЛМР-1 ПС «Мироб» 35/6 кВ. Результаты расчётов для защит остальных рассматриваемых отходящих линий приведены в табл. 2.

$$D_{\text{пф}} = \frac{N_{\text{пф}}}{N_{033}} = \frac{17}{21} = 0,8095 \quad D_{\text{оф}} = \frac{N_{\text{оф}}}{N_{\text{н}}} = \frac{4}{23} = 0,1739 \quad P_6 = \frac{N_{\text{пф}}}{N_{\text{пф}} + N_{\text{н}}} = \frac{17}{17+4} = 0,8095$$

Таблица 2 – Результаты расчетов основных показателей достоверности защиты отходящих линиях 2021–2025 гг.
Table 2 – Results of Calculating the Main Reliability Performance Indicators of the Protection Systems for Outgoing Feeders (2021–2025)

№ п/п	Номер ячейки (отходящая линия)	Достоверность правильного функционирования, $D_{\text{пф}}$	Достоверность ошибочного функционирования, $D_{\text{оф}}$	Вероятность безотказной работы, P_6
ПС «Мироб» 35/6 кВ				
1.	ЛМР-1 (ВЛ)	0,8095	0,1739	0,8095
	ЛМР-2 (ВЛ)	0,9231	0,0556	0,9231
	ЛМР-5 (ВЛ)	1	0	1
	ЛМР-11(ВЛ)	0,8333	0,1250	0,8333
ПС «Хамандони» 35/10 кВ				
2.	ЛХМ-3 (ВЛ)	0,6667	0,2667	0,6667
	ЛХМ-4 (ВЛ)	0,7222	0,2128	0,7222
	ЛХМ-6 (ВЛ)	0,8286	0,1250	0,8286
	ЛХМ-9 (ВЛ)	0,8000	0,1667	0,8000
	ЛХМ-10 (ВЛ)	0,6667	0,2857	0,6667
	ЛХМ-12 (ВЛ)	0,8684	0,1087	0,8684
	ЛХМ-16 (ВЛ)	0,8367	0,1250	0,8367
	ЛХМ-18 (ВЛ)	0,5714	0,3333	0,5714
	ЛХМ-19 (ВЛ)	0,7838	0,1702	0,7838
	ЛХМ-20 (ВЛ)	0,6667	0,2500	0,6667
	ЛХМ-21 (ВЛ)	1	0	1

Обсуждение

Как следует из анализа данных, представленных в табл. 2, показатели достоверности функционирования защит от однофазных замыканий на землю на рассматриваемых отходящих линиях существенно различаются.

Значение достоверности правильного функционирования на отходящих линиях ПС «Мироб» 35/6 кВ изменяется в диапазоне от 0,8095 (ЛМР-1) до 1 (ЛМР-5). При этом максимальное значение достоверности ошибочного функционирования зафиксировано для защиты линии ЛМР-1, что, вероятно, обусловлено её неселективным действием или некорректной отстройкой защиты.

Аналогичные показатели на ПС «Хамандони» 35/10 кВ имеют разнообразный вид и характеризуются относительно широким диапазоном варьирования – от 0,5714 до 1. Такие значения свидетельствуют о различном уровне достоверности функционирования защит рассматриваемых отходящих линий. Как следует из табл. 2, наименьшие значения правильного функционирования наблюдаются на отходящих линиях ЛХМ-18 и ЛХМ-3. Вероятно, защиты, применяемые на этих линиях, обладают недостаточной чувствительностью, имеют некорректную отстройку либо в большей степени подвержены влиянию внешних факторов, таких как режимы работы электрической сети.

Исходя из приведённых расчётов, видно, что наименьшей вероятностью безотказной работы характеризуются защиты отходящих линий ЛХМ-3, ЛХМ-10, ЛХМ-18 и ЛХМ-20. Это свидетельствует о необходимости принятия мер по повышению надёжности функционирования их защит.

Следовательно, результаты обработки статистических показателей функционирования защит отходящих линий рассматриваемых подстанций показывают, что степень достоверности их функционирования на различных подстанциях носит разнообразный характер. В связи с этим целесообразно проведение индивидуальной оценки защит линий напряжением 6–10 кВ с целью повышения надёжности их функционирования для каждой линии электрической сети.

Заключение

В рамках данной работы выполнена оценка достоверности функционирования защит от ОЗЗ в сетях напряжением 6–10 кВ. С этой целью проведён анализ пятилетних статистических данных, полученных из рукописных документов – оперативных журналов ПС «Мироб» 35/6 кВ и ПС «Хамадони» 35/10 кВ. На основе записей об аварийных отключениях рассматриваемых отходящих линий были выделены количественные показатели срабатывания релейной защиты при однофазных замыканиях на землю. Кроме того, в журналах зафиксированы данные о ложных срабатываниях и иных факторах, влияющих на функционирование систем релейной защиты от ОЗЗ. На основании проведённого анализа с использованием действующих методик определены основные показатели достоверности функционирования релейной защиты отходящих линий рассматриваемых подстанций.

По результатам проведённого исследования установлено, что показатели достоверности функционирования релейной защиты на отдельных отходящих линиях носят разнообразный характер, что обусловлено условиями эксплуатации, техническим состоянием устройств релейной защиты, а также особенностями отстройки их параметров при защите линий от однофазных замыканий на землю. В связи с этим обоснована необходимость проведения комплекса организационно-технических мероприятий по корректировке параметров защит, направленных на повышение надёжности и эффективности их функционирования.

Обоснована необходимость проведения индивидуальной оценки показателей достоверности функционирования релейной защиты для каждой рассматриваемой отходящей линии. Применение предложенных рекомендаций способствует повышению основных показателей достоверности релейной защиты от ОЗЗ в распределительных электрических сетях напряжением 6–10 кВ. Полученные результаты могут быть использованы при разработке нормативных документов в области релейной защиты, а также при проектировании систем релейной защиты с учётом специфических местных условий.

Рецензент: Сидоров А.И. — д.т.н., профессор кафедры БЖД, ЮУрГУ

Литература

1. Химояи релеи таҳизоти электроэнергетикӣ / R.T. Abdullozoda, D.D. Davlatshoev, B.T. Abdulloev, N.Kh. Tabarov. – Душанбе : Промэкспо, 2018. – 333 p. – ISBN 978-99975-998-5-8. – EDN FWKDUG.
2. Андреев, В.А. Релейная защита и автоматика систем электроснабжения : учебник / В.А. Андреев. – М.: Высшая школа, 2008. – 640 с.
3. Шабад, М.А. Защита от однофазных замыканий на землю в сетях 6–35 кВ / М.А. Шабад. – М.: Энергоатомиздат, 2001. – 240 с.
4. Анализ преимуществ микропроцессорных релейных защит перед электромеханическими, применяемых в подстанции "Академгородок -110/35/10 кВ" / Р.Т. Абдуллозода, У.У. Косимов, П.А. Аминов, И.Т. Абдуллоев // Политехнический вестник. Серия: Инженерные исследования. – 2019. – № 2(46). – С. 33-39. – EDN PBVAVR.
5. Horowitz, S.H. Power System Relaying / S.H. Horowitz, A.G. Phadke. – 4th ed. – Hoboken: John Wiley & Sons, 2014. – 416 p.
6. Абдуллозода, Р. Т. Статистический анализ повреждаемости линий 6-10 кВ на примере отдельных подстанций Южной части Таджикистана / Р. Т. Абдуллозода // Политехнический вестник. Серия: Инженерные исследования. – 2026. – № 1(73). – С. 6-12. – DOI 10.65599/ENG4701. – EDN BMKLYA.
7. Папков, Б.В. Надёжность и эффективность современного электроснабжения: монография / Б.В. Папков, П.В. Илюшин, А.Л. Куликов. – Нижний Новгород: Научно-издательский центр «XXI век», 2021. – 160 с.
8. Оперативный журнал ПС «Мироб» 35/6 кВ. – Рукописный документ. – Период: 2020 – 2025 гг.
9. Оперативный журнал ПС «Хамадони» 35/10 кВ. – Рукописный документ. – Период: 2021 – 2025 гг.
10. Абдуллозода, Р.Т. Учебно-лабораторный стенд для исследования схем соединения трансформаторов тока и обмоток реле / Р.Т. Абдуллозода // Политехнический вестник. Серия: Инженерные исследования. – 2021. – № 3(55). – С. 5-7. – EDN WXZNOG.

Reference

1. Relay protection and automation of power supply systems / R.T. Abdullozoda, D.D. Davlatshoev, B.T. Abdulloev, N.Kh. Tabarov. – Dushanbe: PromExpo, 2018. – 333 p. – ISBN 978-99975-998-5-8. – EDN FWKDUG.
2. Andreev, V.A. Relay protection and automation of power supply systems: a textbook / V.A. Andreev. – Moscow: Vysshaya shkola, 2008. – 640 p.
3. Shabad, M.A. Protection against single-phase ground faults in 6–35 kV networks / M.A. Shabad. – Moscow: Energoatomizdat, 2001. – 240 p.
4. Analysis of the advantages of microprocessor-based relay protection systems over electromechanical ones used in the Akademgorodok-110/35/10 kV substation / R.T. Abdullozoda, U.U. Kosimov, P.A. Aminov, I.T. Abdulloev // Polytechnic Bulletin. Series: Engineering Research. - 2019. - No. 2 (46). - Pp. 33-39. - EDN PBVAVR.

5. Horowitz, S.H. Power System Relaying / S.H. Horowitz, A.G. Phadke. - 4th ed. - Hoboken: John Wiley & Sons, 2014. - 416 p.
6. Abdullozoda, R. T. Statistical analysis of damage to 6-10 kV lines using the example of individual substations in the southern part of Tajikistan / R. T. Abdullozoda // Polytechnic Bulletin. Series: Engineering Research. - 2026. - No. 1 (73). - Pp. 6-12. - DOI 10.65599 / ENG4701. - EDN BMKLYA.
7. Papkov, B.V. Reliability and efficiency of modern power supply: monograph / B.V. Papkov, P.V. Ilyushin, A.L. Kulikov. - Nizhny Novgorod: Scientific Publishing Center "XXI Century", 2021. - 160 p.
8. Operational log of the 35/6 kV Mirob substation. - Handwritten document. – Period: 2020–2025.
9. Operational log of the 35/10 kV Hamadoni substation. – Handwritten document. – Period: 2021–2025.
10. Abdullozoda, R.T. Educational and laboratory setup for studying connection diagrams of current transformers and relay windings / R.T. Abdullozoda // Polytechnic Bulletin. Series: Engineering Research. – 2021. – No. 3(55). – Pp. 5-7. – EDN WXZNOG.

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРЕ – МАЪЛУМОТ ДАР БОРАИ МУАЛЛИФ – INFORMATION ABOUT AUTHOR

TJ	RU	EN
Абдуллозода Рамазон Толибҷон	Абдуллозода Рамазон Толибджон	Ramazon Abdullozoda
н.и.т., дотсент	к.т.н., доцент	Ph.D., Associate Professor
ДТТ ба номи академик М.С. Осимӣ	ТТУ имени академика М.С. Осими	TTU named after academician M.S. Osimi
E-mail: abdullozoda@ttu.tj		
https://orcid.org/0000-0002-2434-4698		

УДК: 621.311

DOI: 10.65599/ENG9951

АНАЛИЗ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ РЕЖИМОВ СЕТИ 110 кВ ДАРХАН — БУГАНТ¹У. Бумцэнд, ²Дж.С. Ахъёев, ¹И. Хишигбаяр, ¹А. Далай¹Технологический институт в г. Дархан-Уул, Монгольский государственный университет науки и технологий, Дархан, Монголия²Таджикский технический университет имени академика М.С. Осими, г. Душанбе, Республика Таджикистан

В работе проведено исследование режимов эксплуатации воздушной линии электропередачи 110 кВ «Дархан-Бугант» - стратегически значимого узла Центральной электроэнергетической системы Монголии, обеспечивающего электроснабжение промышленных и социально-бытовых потребителей аймака Сэлэнгэ. Проанализировано влияние природно-географических условий на конфигурацию сети: установлено, что трасса линии проходит через лесные массивы (20,4 %), сельскохозяйственные угодья (31 %) и степные зоны (49,6 %), что косвенно определяет эксплуатационные особенности инфраструктуры. Исследовано поведение сети в характерных режимах нагрузок: выявлено, что в зимний максимум наблюдаются рост потерь активной мощности и выход показателей напряжения за нормативные пределы, а в режимах минимальных нагрузок - избыточная генерация реактивной мощности из-за зарядной ёмкости линии. Изучено распределение мощностей и уровней напряжения в узлах сети на основе фактических данных замеров за 2024–2025 гг.; для расчётов использован программный комплекс DIgSILENT PowerFactory с применением метода Ньютона-Рафсона как наиболее эффективного для расчёта установившихся режимов. Определено, что суммарные потери мощности в сети достигают 5,65 % от общей передаваемой мощности; детально структурированы составляющие потерь по элементам сети - линиям электропередачи и трансформаторам. Установлено несоответствие фактических значений коэффициента реактивной мощности нормативным требованиям: анализ потокораспределения выявил избыточный переток реактивной мощности от подстанции «Тумуртэй» в сеть, что дестабилизирует режим работы. Сформировано несколько технических сценариев повышения энергоэффективности: рассмотрено увеличение сечения проводов (в том числе применение марок АС-70 и АС-120) и установка шунтирующих реакторов мощностью 2×3 Мвар на шинах низкого напряжения подстанции «Тумуртэй». Предложено комбинированное управление U-Q как рациональное решение для ограничения перенапряжений и обеспечения статической устойчивости режима; разработаны расчётные модели для оценки эффективности каждого сценария, включая сравнение уровней напряжения и объёмов потерь. Обоснована экологическая значимость снижения технических потерь: с учётом коэффициента эмиссии энергосистемы Монголии (0,9 кг CO₂/кВт·ч) ежегодная экономия электроэнергии в размере 80 760 кВт·ч позволяет сократить выбросы CO₂ на 72,7 тонны в год - эффект сопоставлен с поглощающей способностью примерно 3300 взрослых деревьев.

Ключевые слова: напряжение, реактивная мощность, сеть, анализ, режим.**ТАҲЛИЛИ РЕЧАҲОИ ЭЛЕКТРИКИИ ШАБАКАҲОИ 110 кВ ДАРХАН–БУГАНТ**¹У. Бумтсэнд, ²Д.С. Ахъёев, ¹И. Хишигбаяр, ¹А. Далай¹Донишгоҳи давлатии илм ва технологияи Муғулистон, донишқадаи технологияи Дархан²Донишгоҳи техникии Тоҷикистон ба номи академик М.С. Осимӣ, ш. Душанбе, Ҷумҳурии Тоҷикистон

Дар мақола речаҳои кори хатти барқи ҳавоӣ 110 кВ «Дархан–Бугант» – шохаи стратегӣ дар Системаи электроэнергетикии Муғулистон, ки истеъмолкунандагони саноатӣ ва маишӣ минтақаи Селенгеро бо барқи таъмин мекунад, мавриди таҳқиқ қарор гирифтаанд. Таъсири шароити табиӣ ва ҷуғрофӣ ба конфигуратсияи шабака таҳлил шудааст: муайян гардид, ки хатсайри хати интиқоли барқ тавассути минтақаҳои ҷангалзор (20,4 %) мегузарад, заминҳои кишоварзӣ (31 %) ва майдонҳои даштӣ (49,6 %), ки ин ба таври ғайримустақим хусусиятҳои кори инфрасохторро муайян мекунад. Таҳлили кори шабака дар шароити маъмулӣ речаҳои бори истеъмолкунандагон омӯхта шуд: маълум шуд, ки дар давраи зимистон талафоти тавоноии ғайрифаъол аз сатҳҳои шиддат аз маҳдудиятҳои стандартӣ зиёд мешаванд, дар речаҳои бори минималӣ бошад истехсоли тавоноии ғайрифаъол аз ҳисоби хатти интиқоли барқ аз ҳад зиёд аст. Тақсими тавоноииҳо ва сатҳи шиддатҳо дар нуктаҳои шабака бар асоси маълумоти воқеии ҷанкунии соли 2024–2025 таҳлил карда шуд; барои ҳисобҳо барномаи комплекси DIgSILENT PowerFactory истифода шуд, ки дар он усули Нютон–Рафсон ҳамчун муассиртарин барои ҳисоби речаҳои муқарраршуда татбиқ гардид. Муайян карда шуд, ки талафоти умумии тавоноӣ дар шабака ба 5,65 %-и тавоноии умумии интиқоли ба баробар аст; ҷузъҳои ин талафот ба таври муфассал аз рӯи унсурҳои шабака – хатҳои интиқоли барқ ва трансформаторҳо – ҷудо карда шудаанд. Муайян шуд, ки қимати воқеии коэффитсиенти тавоноии ғайрифаъол ба талаботи меъёрӣ мувофиқат намекунад, таҳлили тақсими тавоноӣ нишон дод, ки тавоноии ғайрифаъол аз зеристгоҳи «Тумуртэй» аз ҳад зиёд ба шабака ҷорӣ мешавад, ки речаи қориро номуътадил мегардонад. Якҷанд сценарияи техникӣ барои беҳтар кардани самаранокии энергетикӣ таҳия шудаанд, ки афзоиш додани ғафсии ноқилҳо (аз ҷумла истифодаи тамғаҳои АС-70 ва АС-120) ва насби реакторҳои шунткунанда бо иқтидори 2×3 Мвар дар таҳтасимҳои шиддати пасти зеристгоҳи «Тумуртэй». Назорати комбинатсионии нишондиҳандаҳои U–Q ҳамчун ҳалли оқилона барои маҳдуд кардани фузуншиддати ва таъмини устувории статикӣ реча пешниҳод шуда, моделҳои ҳисоббарорӣ барои арзёбии самаранокии ҳар як сценария, аз ҷумла муқоисаи сатҳҳои шиддат ва сатҳҳои талафот, таҳия шудаанд. Аҳамияти экологӣ дар қоҳиш додани талафоти техникӣ нишон дода шудааст, бо дарназардошти зарифи ихроҷи системаи энергетикӣ Муғулистон (0,9 кг CO₂/кВт·соат) ва сарфаи солони барқ ба миқдори 80 760 кВт·соат имкон

медиад, ки партоби CO₂ дар як сол 72,7 тонна кам шавад, ки ба иқтисоди нигохдории карбон тақрибан 3 300 дарахти калон баробар аст.

Калидвожаҳо: шиддат, тавоноии реактивӣ, шабака, таҳлил, реча.

ANALYSIS OF THE 110 KV ELECTRICAL GRID OPERATING MODES: DARKHAN – BUGANT

¹U. Bumtsend, ²J.S. Ahyoev, ¹I. Khishigbayar, ²A. Dalai

¹Darkhan-Uul Institute of Technology, Mongolian National University of Science and Technology, Darkhan, Mongolia

²Tajik Technical University named after Academician M.S. Osimi, Dushanbe, Republic of Tajikistan

The paper studies the operating modes of the 110 kV Darkhan-Bugant overhead power line, a strategically important hub of the Central Electric Power System of Mongolia, providing electricity to industrial and social consumers in Selenge aimag. The influence of natural and geographical conditions on the network configuration is analyzed: it is established that the line route passes through forests (20.4%), agricultural lands (31%) and steppe zones (49.6%), which indirectly determines the operational features of the infrastructure. The behavior of the network under typical load conditions is investigated: it is revealed that during the winter maximum, an increase in active power losses and voltage indicators beyond the regulatory limits are observed, and in minimum load modes, excess reactive power generation is due to the charging capacity of the line. The distribution of powers and voltage levels in the network nodes is studied based on actual measurement data for 2024-2025. The DIGSILENT PowerFactory software package was used for calculations using the Newton-Raphson method, as the most effective for calculating steady-state modes. It was determined that the total power losses in the network reach 5.65% of the total transmitted power; the components of losses by network elements - power lines and transformers - were structured in detail. A discrepancy between the actual values of the reactive power factor and the regulatory requirements was established: the flow distribution analysis revealed an excess flow of reactive power from the Tumorkey substation to the network, which destabilizes the operating mode. Several technical scenarios for improving energy efficiency were developed: an increase in the cross-section of wires (including the use of AC-70 and AC-120 brands) and the installation of shunt reactors with a capacity of 2x3 Mvar on the low-voltage buses of the Tumorkey substation were considered. Combined U-Q control was proposed as a rational solution for limiting overvoltages and ensuring static stability of the mode; Calculation models were developed to evaluate the effectiveness of each scenario, including a comparison of voltage levels and loss volumes. The environmental significance of reducing technical losses was substantiated: taking into account the emission factor of the Mongolian power system (0.9 kg CO₂/kWh), annual electricity savings of 80,760 kWh allow for a reduction in CO₂ emissions by 72.7 tons per year - the effect is comparable to the absorption capacity of approximately 3,300 mature trees.

Keywords: voltage, reactive power, network, analysis, mode.

Введение

Обеспечение надежной и устойчивой работы современных энергетических систем, а также минимизация технических потерь в электросетях являются основополагающими факторами повышения технико-экономической эффективности энергетического сектора. Воздушная линия электропередачи 110 кВ направления «Дархан-Бугант», являющаяся важным узлом Центральной электроэнергетической системы Монголии, представляет собой стратегически значимую инфраструктуру, обеспечивающую растущие потребности горнодобывающей промышленности, производственных предприятий и социально-бытовых потребителей региона [1-2].

Особенностью линии направления «Дархан-Бугант» является преимущественное электроснабжение крупных промышленных объектов горнорудного сектора, что обуславливает значительную волатильность графиков нагрузки. В периоды зимнего максимума нагрузок наблюдаются существенный рост потерь активной мощности и выход показателей качества напряжения за пределы нормативных допусков. Напротив, в режимах минимальных нагрузок проявляется эффект избыточной генерации реактивной мощности за счет зарядной емкости линии, что приводит к недопустимому повышению уровней напряжения и дестабилизации режима работы сети. В связи с этим проведение комплексного анализа параметров напряжения, распределения мощностей и величин технических потерь в узлах данной сети является актуальной задачей, результаты которой необходимы для обоснованного перспективного планирования и оптимизации режимов эксплуатации [3-4].

Постановка задачи

Объект исследования и исходные данные

Линия электропередачи 110 кВ «Дархан-Бугант», находящаяся в ведении Центрального филиала АО «Национальная электрическая сеть Монголии», расположена на территории аймака Сэлэнгэ. Регион характеризуется разнообразными природно-географическими условиями, относящимися к зоне резко континентального климата и лесостепного переходного пояса. В

частности, трасса линии проходит на 20,4% через лесные массивы, на 31% - через сельскохозяйственные угодья и на 49,6% - через степные зоны [5]. По всей протяженности линии через ответвления осуществляется электроснабжение потребителей сомонов Бугант, Худэр, Тосгон и Ероо аймака Сэлэнгэ, а также ряда золотодобывающих приисков, рудников и горно-обогачительных комбинатов. Несмотря на среднюю протяженность, данная линия классифицируется как малонагруженная.

Для расчета установившихся режимов электропередающей сети 110 кВ направления Ероо использовались следующие исходные данные: принципиальные электрические схемы, фактические данные замеров нагрузок за период 2024–2025 гг., а также технические характеристики и типы установленного электрооборудования. График годовой нагрузки представлен на Рисунке 1.

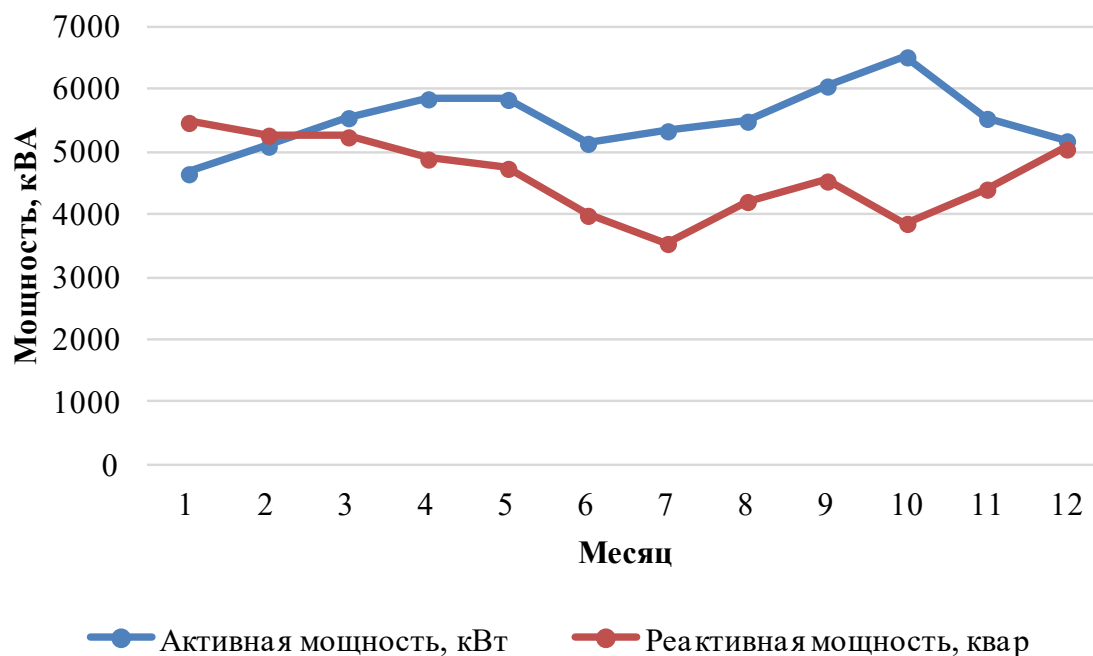


Рисунок 1 – График нагрузки электрической сети 110 кВ «Дархан-Бугант»
Figure 1 – Load Profile of the 110 kV Darkhan–Bugant Power Network

Методология исследования и программное обеспечение

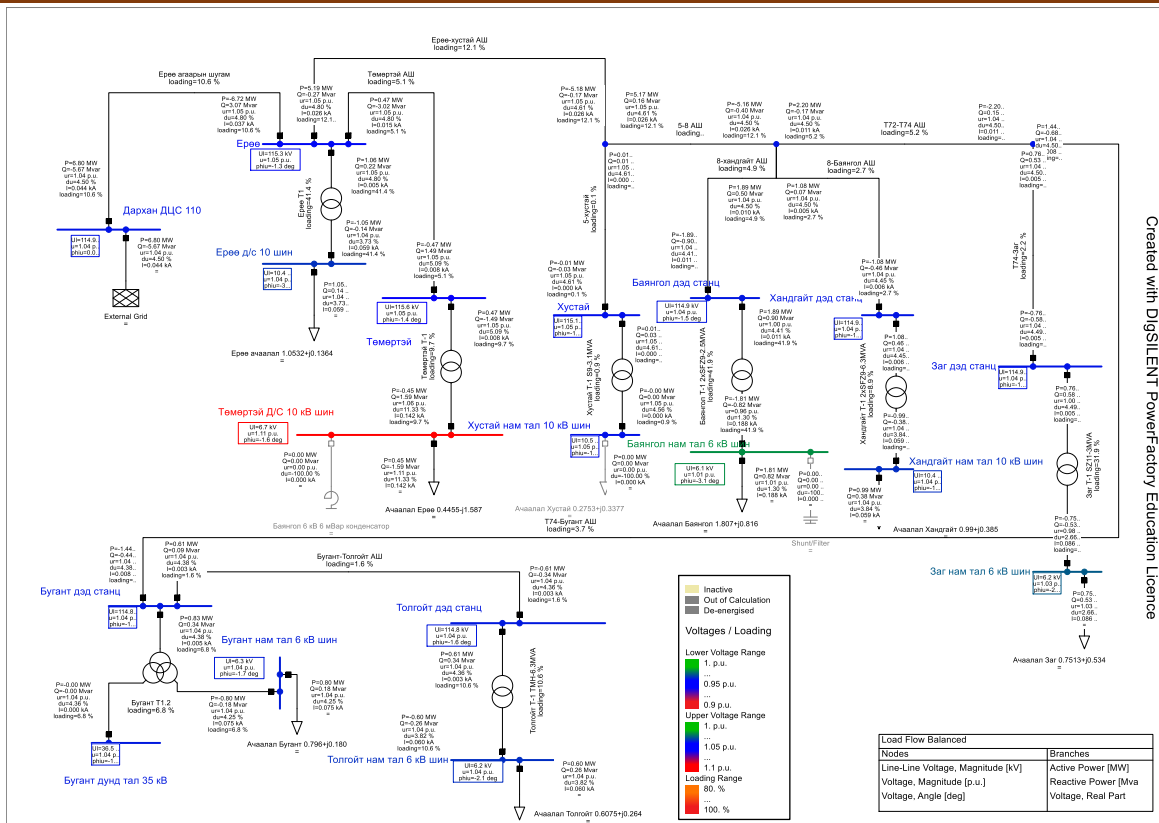
При расчете установившихся режимов электроэнергетических систем на практике широко применяются такие классические методы, как метод Ньютона-Рафсона и метод Гаусса-Зейделя. Используемый в данной работе программный комплекс DIgSILENT PowerFactory поддерживает несколько математических методов расчета режимов, однако основным и наиболее эффективным является метод Ньютона-Рафсона [6-7].

Расчет установившегося режима (потокораспределения) выполняется для достижения трех основных целей:" [8-9]:

- Определение уровней напряжения на шинах узлов сети;
- Определение степени загрузки силового оборудования;
- Определение потерь мощности и электроэнергии в элементах сети.

На основе данных измерений зимнего максимума нагрузок Центрального филиала за 2024–2025 гг. были произведены расчеты напряжений в узлах уровней загрузки оборудования и величин технических потерь мощности в сети направления «Дархан-Бугант».

В целях обеспечения конфиденциальности схемы, модель электрической сети, интегрированная в программную среду, представлена в упрощенном виде на Рисунке 2.



Created with DIGISILENT PowerFactory Education License

Рисунок 2 – Визуализация расчетной модели режима зимнего максимума нагрузок в программной среде
Figure 2 – Visualization of the Calculated Model for the Winter Peak Load Operating Condition in the Software Environment

Результаты расчета режима

По результатам расчета установившегося режима для текущих условий эксплуатации суммарные потери мощности в сети составили кВА, что соответствует 5,65% от общей передаваемой мощности. Структура возникших потерь с разделением по линиям электропередачи и трансформаторам представлена на Рисунке 3.

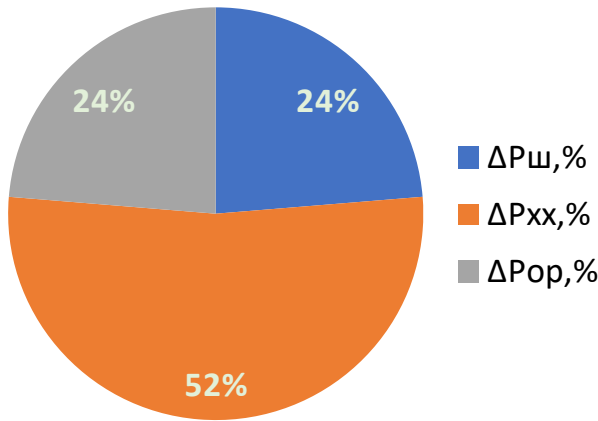


Рисунок 3 – Результаты базового расчета (исходное состояние системы)
Figure 3 – Results of the Base-Case Calculation (Initial System State)

Учитывая, что протяженность линии «Дархан-Бугант» до первой подстанции составляет 68 км, что охватывает большую часть данной сети, как вариант была рассмотрена возможность повышения энергоэффективности за счет увеличения сечения проводов. Результаты оценки потенциальной экономии электроэнергии приведены в Таблице 1.

Таблица 1 – Результаты расчета при использовании провода марки AC-120 (без подключения шунтирующего реактора)
Table 1 – Results of the Power Flow Calculation Using an AC-120 Conductor (Without a Shunt Reactor)

Виды потерь мощности	$\Delta S_{сети}$	$\Delta S_{лэн}$	$\Delta S_{мп}$	ΔS_{xx}
Доля потерь активной мощности, кВт	319,8	23,7	343,5	52,6
Доля потерь полной мощности от общей передаваемой, %	5,21			

Значения отклонения напряжения, являющегося одним из показателей качества электроэнергии, в узлах данной сети превышают нормально допустимые нормы (Рис. 4). В связи с этим возникает необходимость проведения анализа напряжения.

Анализ уровней напряжения

Согласно результатам расчета режима зимнего максимума нагрузок, полная нагрузка сети составила $P=6,4$ МВт и $Q=0,7$ Мвар. Потери активной мощности составили 0,6 МВт, а потери реактивной мощности – 6,1 Мвар, что свидетельствует о значительном избытке реактивной мощности в сети. Потребляемая мощность из сети составила $P=7,0$ МВт и $Q=8,9$ Мвар, что подтверждает недостаточную регулировку реактивной мощности в данном режиме.

Результаты расчета также выявили следующие показатели уровней напряжения:

- Максимальное напряжение: 122,87 кВ
- Минимальное напряжение: 113,52 кВ

	nom.V [kV]	Bus - voltage [p.u.]	[kV]	[deg]	-10	-5	Voltage - Deviation [%] 0	+5	+10
Баянгол дэд станц	110.00	1.038	114.17	-1.75					
Баянгол нам тал 6 кВ шин	6.00	1.007	6.04	-3.36					
Бугант дунд тал 35 кВ	35.00	1.037	36.31	-1.80					
Бугант дэд станц	110.00	1.038	114.14	-1.81					
Бугант нам тал 6 кВ шин	6.00	1.036	6.22	-2.00					
Дархан ДЦС 110	110.00	1.045	114.95	0.00					
Ерөө	110.00	1.042	114.60	-1.51					
Ерөө д/с 10 шин	10.00	1.031	10.31	-3.84					
Заг дэд станц	110.00	1.039	114.26	-1.72					
Заг нам тал 6 кВ шин	6.00	1.020	6.12	-3.19					
Толгойт дэд станц									
Grid: тооцоо System Stage: тооцоо Study Case: 04 With load ubul Annex: / 2									
	nom.V [kV]	Bus - voltage [p.u.]	[kV]	[deg]	-10	-5	Voltage - Deviation [%] 0	+5	+10
Толгойт нам тал 6 кВ шин	110.00	1.037	114.12	-1.82					
Төмөртэй	6.00	1.032	6.19	-2.34					
Төмөртэй д/с 10 кВ шин	110.00	1.045	114.93	-1.63					
Төмөртэй д/с 10 кВ шин	6.00	1.107	6.64	-1.81					
Хандгайт дэд станц	110.00	1.038	114.22	-1.73					
Хандгайт нам тал 10 кВ шин	10.00	1.032	10.32	-2.10					
Хустай	110.00	1.040	114.39	-1.65					
Хустай нам тал 10 кВ шин	10.00	1.039	10.39	-1.65					

Рисунок 4 – Фактические значения узловых напряжений по результатам базового расчета
Figure 4 – Actual Bus Voltage Values Obtained from the Base-Case Calculation

Данные показатели превышают верхний предел допустимого диапазона $\pm 5\%$ (1,117 о.е. > 1,05 о.е.), при этом тенденция к чрезмерному повышению напряжения проявляется преимущественно в узлах с преобладанием длинных линий при режимах малых нагрузок. Есть основания полагать, что это является следствием доминирующего влияния зарядной емкости линий электропередачи [7-9].

Согласно положениям пунктов 1.8.37–1.8.39 главы 1.8 Правил технической эксплуатации, коэффициент мощности потребителей электрической энергии в зависимости от уровня напряжения должен составлять, как правило, не менее 0,9–0,95 [9-11]. В соответствии с этим, коэффициент реактивной мощности сети также должен поддерживаться на надлежащем уровне в зависимости от класса напряжения, как показано в Таблице 2. В нормальных режимах эксплуатации допускаются колебания значений ($\text{tg}\phi$ и $\cos\phi$) в интервале.

Таблица 2 – Допустимые пределы коэффициента реактивной мощности

Table 2 – Permissible Limits of the Reactive Power Factor

Уровень напряжения в точке присоединения потребителя электрической энергии	Максимальное значение коэффициента реактивной мощности в период суточного максимума нагрузки в электрической сети, $\text{tg}\varphi$	Соответствующий коэффициент $\cos\varphi$
110 кВ	0,50	0,89
35 кВ	0,40	0,93
6 - 20 кВ	0,40	0,93
0,4 кВ (380В)	0,35	0,94

Любой потребитель электрической энергии заключает договор с энергоснабжающей организацией и в рамках выполнения условий договора обязуется соблюдать следующие требования [12-14]:

- Соблюдение режимов электропотребления: Строгое соблюдение установленных режимов потребления (или выработки) электроэнергии, зафиксированных в договоре и технических условиях на присоединение к сети.

- Обеспечение показателей качества электроэнергии: Поддержание показателей качества электрической энергии на границе балансовой принадлежности в соответствии со стандартными требованиями в процессе эксплуатации собственных сетей и электроустановок. В частности, обеспечение устойчивого поддержания надлежащего соотношения активной и реактивной мощностей (коэффициентов $\text{tg}\varphi$ эсвл $\cos\varphi$) для объекта в целом и отдельных энергоустановок на уровнях, определенных договором.

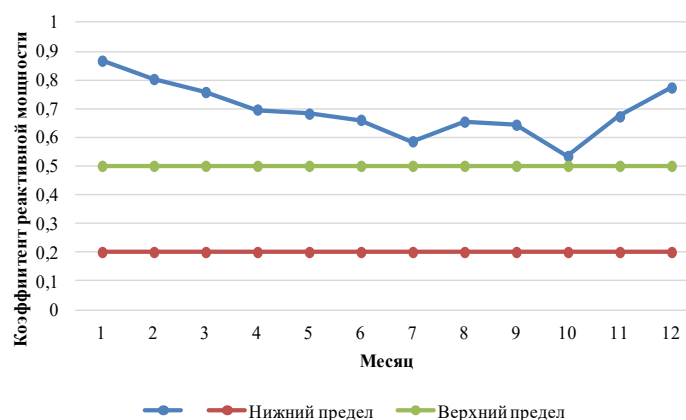


Рисунок 5 – Коэффициент реактивной мощности линии «Дархан-Бугант»

Figure 5 – Reactive Power Factor of the Darkhan-Bugant Line

Передающая сеть «Дархан-Бугант» характеризуется постоянными колебаниями потребления и генерации реактивной мощности. В ряде случаев она функционирует в режиме генератора, выдавая реактивную мощность в сеть, в то время как в других ситуациях наблюдается ее значительное потребление.

На рисунке 5 представлено сравнение фактического коэффициента реактивной мощности электрической сети «Дархан-Бугант» с нормативными значениями. Из приведенного графика видно, что коэффициент реактивной мощности не соответствует установленным нормам. Анализ результатов расчета установившегося режима, в частности потокораспределения реактивной мощности и фактических значений узловых напряжений, показывает наличие избыточного перетока реактивной мощности от подстанции «Тумуртэй» в сеть.

В связи с этим признано целесообразным рассмотреть установку реакторов мощностью 2х3 Мвар на шинах низкого напряжения данной подстанции, после чего был произведен повторный расчет режима. Расчеты выполнялись как варианты для двух сценариев: до и после замены головного участка линии на провод марки АС-120. Сводные результаты данных вариантов представлены в таблицах 3 и 4.

Таблица 3 – Результаты расчета при использовании провода AC-70 с подключенным реактором

Table 3 – Calculation Results Using an AC-70 Conductor with a Connected Reactor

Виды потерь мощности	$\Delta S_{сети}$	$\Delta S_{лн}$	$\Delta S_{мп}$	$\Delta S_{хх}$
Доля потерь активной мощности, кВт	392,7	33,4	66,6	42,8
Доля потерь полной мощности от общей передаваемой, %	5,42			

Таблица 4 – Результаты расчета при использовании провода марки AC-120 с подключенным реактором

Table 4 – Calculation Results Using an AC-120 Conductor with a Connected Reactor

Виды потерь мощности	$\Delta S_{сети}$	$\Delta S_{лн}$	$\Delta S_{мп}$	$\Delta S_{хх}$
Доля потерь активной мощности, кВт	354,2	26,4	73,6	47,4
Доля потерь полной мощности от общей передаваемой, %	4,92			

На Рисунке 6 представлен график сравнения уровней напряжения до и после установки реактора.

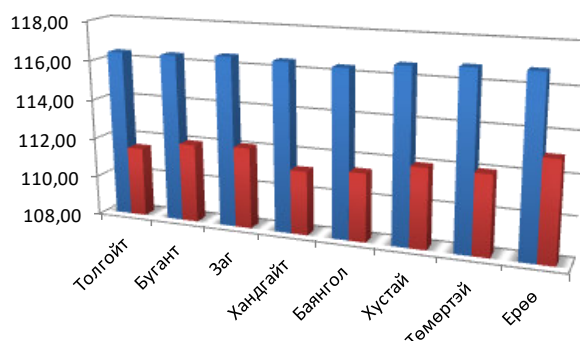


Рисунок 6 – Сравнительный график уровней напряжения до (синие) и после (красные) установки реактора

Figure 6 – Comparative Graph of Voltage Levels Before (Blue) and After (Red) Reactor Installation

Если до установки реактора значения отклонения напряжения находились в диапазоне 3,20–6,19 %, то после применения компенсирующего устройства они снизились до 1,37–2,73 %, что обеспечило общее улучшение уровня напряжения в среднем на 4 %.

Оценка экологической эффективности

Снижение технических потерь в энергосистеме, помимо прямого экономического эффекта, имеет высокую экологическую значимость, выражающуюся в сокращении выбросов парниковых газов. Учитывая, что более 90% электроэнергии в Монголии вырабатывается угольными тепловыми электростанциями, оценку энергосбережения необходимо проводить в прямой корреляции с выбросами диоксида углерода.

В данном исследовании в качестве нормативного справочника был использован коэффициент эмиссии энергосистемы Монголии ($EF = 0,9 \text{ кг CO}_2 / \text{кВт}\cdot\text{ч}$), утвержденный в рамках “Механизма чистого развития” Рамочной конвенции ООН об изменении климата. Расчеты показали, что ежегодная экономия электроэнергии в размере 80 760 кВт·ч, достигнутая в результате модернизации сети, позволяет сократить выбросы CO_2 в атмосферу на 72,7 тонны в год. Для сопоставления экологического эффекта с естественным восстановлением природы было установлено, что данный объем сокращения выбросов эквивалентен поглощающей способности примерно 3300 взрослых деревьев (при среднем показателе поглощения 22 кг CO_2 на одно дерево в год).

Заключение

На основании анализа режимов и оценки эффективности технической модернизации электропередающей сети 110 кВ «Дархан-Бугант» сделаны следующие выводы:

- После установки компенсирующего устройства при использовании провода марки AC-70 потери активной мощности составляли 392,70 кВт (5,42 %), а при замене провода на AC-120 данный

показатель снизился до 354,24 кВт (4,92 %). Это подтверждает возможность снижения потерь мощности в период максимума нагрузок на 38,46 кВт, что соответствует снижению относительных потерь на 0,50 %.

- Расчеты показали, что увеличение сечения проводника позволяет достичь среднегодовой экономии электроэнергии в размере 80 760 кВт·ч. При оценке по среднему тарифу (265 тугриков/кВт·ч) прямой экономический эффект составит 21,40 млн тугриков в год.

- Результаты моделирования выявили, что максимальное напряжение в узлах сети достигает 122,87 кВ (1,117 о.е.), что существенно превышает допустимые пределы. Установка шунтирующих реакторов мощностью 2х3 Мвар на стороне 10 кВ подстанции «Тумуртэй» с применением комбинированного управления U-Q признана наиболее рациональным решением для ограничения перенапряжений и обеспечения статической устойчивости режима.

- Снижение потерь электроэнергии позволяет сократить выбросы диоксида углерода на 72,7 тонны в год. С точки зрения воздействия на окружающую среду данный экологический эффект эквивалентен поглощающей способности 3300 деревьев, высаживаемых ежегодно.

Рецензент: Киргизов А.К. — к.т.н., доцент кафедры «Электрические станции» ПНПУ имени академика М.С. Осими

Литература

1. Цолмон, Н. Система «зелёной» энергетики Монголии, развитие энергосбережения и эффективности: отчёт о результатах деятельности и программ Глобального института зелёного роста (GGGI) в энергетическом секторе Монголии / Н. Цолмон, С. Дэрэкэ Сэншо. – Улан-Батор, 2020.
2. Содномдорж, Д. Режимы электрических систем / Д. Содномдорж. – Улан-Батор: Изд-во ШУТИС (МГТУ), 2005. – 350 с.
3. Национальное агентство по метеорологии и мониторингу окружающей среды Монголии. – [Электронный ресурс]. – URL: <https://namem.gov.mn/> (дата обращения: 20.04.2026).
4. PowerFactory 2026. Integrated Power System Analysis Software. User Manual / DIgSILENT GmbH. – 2026.
5. Bergen, A. R. Power Systems Analysis / A. R. Bergen, V. Vittal. – 2nd Edition. – Prentice-Hall, 2000. – ISBN 0-13-691910-3. (Оригинал: 1986).
6. Лыкин, А. В. Электрические системы и сети: учебное пособие / А. В. Лыкин; под ред. П. И. Бартоломея. – Новосибирск: НГТУ, 2006. – 254 с. – ISBN 5-98704-055-8.
7. Ахьеев, Д. С. Оптимизация режимов работы городских электрических сетей / Д. С. Ахьеев // Политехнический вестник. Серия: Инженерные исследования. – 2019. – № 1(45). – С. 40–44.
8. Развитие электроэнергетической системы после электрификации железной дороги / У. Бумцэнд, Д. Д. Давлатшоев, Д. С. Ахьеев [и др.] // Политехнический вестник. Серия: Инженерные исследования. – 2021. – № 1(53). – С. 24–30.
9. Джуразода, Ш.Д. Инструментальная оценка качества электрической энергии в южных электрических сетях Республики Таджикистан / Ш. Д. Джуразода, М. К. Джаборов, З. Х. Хабибуллозода, М. М. Вохидов // Политехнический вестник. Серия: Инженерные исследования. – 2025. – № 1(69). – С. 5–16.
10. Bumtsend, U. Optimization of electric power system modes by methods of artificial intelligence / U. Bumtsend, S. Kokin, N. Djagarov et al. // Proceedings of the 2020 21st International Scientific Conference on Electric Power Engineering (EPE). – Prague, Czech Republic, 2020. – Pp. 1–4. – DOI: 10.1109/EPE51172.2020.9269195.
11. Манусов, В. З. Анализ и оптимизация режимов электроэнергетической системы Монголии с учётом электрификации Улан-Баторской железнодорожной магистрали / В. З. Манусов, У. Бумцэнд, Э. Энхсайхан // Новое в российской электроэнергетике. – 2017. – № 10. – С. 55–66.
12. Оценка статической устойчивости электроэнергетической системы с учётом электрификации железной дороги / У. Бумцэнд, Д. С. Ахьеев, М. Х. Сафаралиев [и др.] // Политехнический вестник. Серия: Инженерные исследования. – 2022. – № 1(57). – С. 5–11.
13. Закон Монголии об энергетике. Правила пользования электрической энергией. – Улан-Батор, 2001.
14. Правила устройства электроустановок (ПУЭ). Издание 7. – М.: КноРус, 2023. – 488 с.

References

1. Tsolmon, N. Mongolia's Green Energy System, Development of Energy Saving and Efficiency: A Report on the Results of the Global Green Growth Institute (GGGI) Activities and Programs in the Mongolian Energy Sector / N. Tsolmon, S. Dereké Sensho. - Ulaanbaatar, 2020.
2. Sodnomdorj, D. Electric System Modes / D. Sodnomdorj. - Ulaanbaatar: SHUTIS Publishing House (MSTU), 2005. - 350 p.

3. National Agency for Meteorology and Environmental Monitoring of Mongolia. - [Electronic resource]. - URL: <https://namem.gov.mn/> (date of access: 20.04.2026).
4. PowerFactory 2026. Integrated Power System Analysis Software. User Manual / DlgSILENT GmbH. – 2026.
5. Bergen, A. R. Power Systems Analysis / A. R. Bergen, V. Vittal. – 2nd Edition. – Prentice-Hall, 2000. – ISBN 0-13-691910-3. (Original: 1986).
6. Lykin, A. V. Electrical Systems and Networks: A Textbook / A. V. Lykin; edited by P. I. Bartolomey. – Novosibirsk: NSTU, 2006. – 254 p. – ISBN 5-98704-055-8.
7. Akhieev, D. S. Optimization of Operating Modes of Urban Electrical Networks / D. S. Akhieev // Polytechnic Bulletin. Series: Engineering Research. – 2019. – No. 1 (45). – P. 40–44.
8. Development of the electric power system after railway electrification / U. Bumtsend, D. D. Davlatshoev, D. S. Akhieev [et al.] // Polytechnic Bulletin. Series: Engineering Research. – 2021. – No. 1 (53). – P. 24–30.
9. Instrumental assessment of the quality of electric energy in the southern electric networks of the Republic of Tajikistan / Sh. D. Jurazoda, M. K. Jaborov, Z. Kh. Khabibullozoda, M. M. Vokhidov // Polytechnic Bulletin. Series: Engineering Research. – 2025. – No. 1 (69). – P. 5–16.
10. Bumtsend, U. Optimization of electric power system modes by methods of artificial intelligence / U. Bumtsend, S. Kokin, N. Djagarov et al. // Proceedings of the 2020 21st International Scientific Conference on Electric Power Engineering (EPE). – Prague, Czech Republic, 2020. – Pp. 1–4. – DOI: 10.1109/EPE51172.2020.9269195.
11. Manusov, V. Z. Analysis and optimization of the modes of the electric power system of Mongolia taking into account the electrification of the Ulaanbaatar railway / V. Z. Manusov, U. Bumtsend, E. Enkhsaikhan // New in the Russian electric power industry. – 2017. – No. 10. – Pp. 55–66.
12. Assessment of the static stability of the electric power system taking into account the electrification of the railway / U. Bumtsend, D. S. Akhieev, M. Kh. Safaraliev [et al.] // Polytechnic Bulletin. Series: Engineering Research. – 2022. – No. 1 (57). – Pp. 5-11.
13. Law of Mongolia on Energy. Rules for the Use of Electric Energy. - Ulaanbaatar, 2001.
14. Electrical Installation Rules (PUE). Edition 7. - Moscow: KnoRus, 2023. - 488 p.

МАЪЛУМОТ ДАР БОРАИ МУАЛЛИФОН-СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ-INFORMATION ABOUT AUTHORS

TJ	RU	EN
Бумтсэнд Уянгасайхан	Бумцэнд Уянгасайхан	Bumtsend Uyangasaikhan
к.т.н., доцент	к.т.н., доцент	Can.tech.scien., Associate Professor
Донишгоҳи давлатии илм ва технологияи Муғулистон, донишқадаи технологияи Дархан	Технологический институт в г.Дархане, Монгольский государственный университет науки и технологий, г. Дархан-Уул, Монголия	School of technology in Darkhan-Uul, Mongolian university of science and technology, Darkhan-Uul, Mongolia
E.mail: uyangasaikhan@stda.edu.mn		
TJ	RU	EN
Ахъёев Чавод Саламшоевич	Ахъёев Джавод Саламшоевич	Ahyoev Javod Salamshoevich
н.и.т., дотсент	к.т.н., доцент	Can.tech.scien., Associate Professor
ДТТ ба номи академик М.С. Осимӣ	ТТУ имени академика М.С. Осими	TTU named after Academician M.S. Osimi
E.mail: Javod@ttu.tj		
TJ	RU	EN
Хишигбаяр Идэр	Хишигбаяр Идэр	Khishigbayar Ider
Магистр	Магистр	Master of Science
Донишгоҳи давлатии илм ва технологияи Муғулистон, донишқадаи технологияи Дархан	Технологический институт в г.Дархане, Монгольский государственный университет науки и технологий, г. Дархан-Уул, Монголия	School of technology in Darkhan-Uul, Mongolian university of science and technology, Darkhan-Uul, Mongolia
E.mail: ider.kh@stda.edu.mn		
TJ	RU	EN
Далай Амарбаясгалан	Далай Амарбаясгалан	Dalai Amarbayasgalan
Магистрант	Магистрант	Master's student
Донишгоҳи давлатии илм ва технологияи Муғулистон, донишқадаи технологияи Дархан	Технологический институт в г.Дархане, Монгольский государственный университет науки и технологий, г. Дархан-Уул, Монголия	School of technology in Darkhan-Uul, Mongolian university of science and technology, Darkhan-Uul, Mongolia
E.mail: amarbayasgalan@stda.edu.mn		

ОПТИМИЗАЦИЯ ГИБРИДНОЙ СИСТЕМЫ ВОЗОБНОВЛЯЕМОЙ ЭНЕРГИИ С НАКОПИТЕЛЯМИ ЭНЕРГИИ

А.К. Киргизов

Таджикский технический университет имени академика М.С. Осими, г. Душанбе, Республика Таджикистан

В статье рассмотрены основные вопросы создания гибридного энергокомплекса на базе возобновляемых источников энергии в горных регионах страны. Из-за непредсказуемости выработки мощности от ВИЭ, особенно солнечной и ветровой, поддержание баланса мощности и частоты является первоочередной задачей создания энергокомплекса. На сегодняшний день существует много способов поддержания баланса мощностей комплекса на основе ВИЭ. В статье предложен метод поддержания баланса мощностей и регулирования частоты на основе использования бассейна суточного реагирования и сверхпроводящего магнитного хранилища энергии. Использование сверхпроводящего магнитного хранилища энергии дает возможность быстрого регулирования частоты до того как частота начнет регулироваться с помощью гидрогенераторов МГЭС.

Ключевые слова: энергокомплекс, бассейн суточного регулирования, энергия, солнечный, частота, баланс, ресурс, потенциал, источники.

ОПТИМИЗАЦИЯ СИСТЕМЫ ГИБРИДНОЙ ДАР АСОСИ МАНБАҶОИ БАҶҚАРОРШАВАНДАИ ЭНЕРГИЯ БО ЗАХИРАКУНАНДАИ ЭНЕРГИЯ

А.К. Қирғизов

Донишгоҳи техникии Тоҷикистон ба номи академик М.С. Осимӣ, ш. Душанбе, Ҷумҳурии Тоҷикистон

Дар ин мақола масъалаҳои калидии сохтани комплекси энергетикӣ гибридӣ, ки бо истифодаи манбаҳои бақароршавандаи энергия дар минтақаҳои қӯҳистони кишвар асос ёфтаанд, баррасӣ мешаванд. Аз сабаби пешгуинашаванда будани истеҳсоли электроэнергия аз манбаҳои бақароршавандаи энергия, бахусус офтоб ва шамол, нигоҳ доштани тавозуни нерӯи барқ ва басомад ҳангоми сохтани комплекси энергетикӣ гибридӣ вазифаи аввалиндараҷа мебошад. Дар айни замон, роҳҳои зиёди нигоҳ доштани тавозуни нерӯи барқ дар комплекси энергетикӣ бо манбаҳои бақароршавандаи энергия мавҷуданд. Дар ин мақола усули нигоҳ доштани тавозуни нерӯи барқ ва танзими басомад бо истифода аз ҳавзи танзими шабонарӯзӣ ва нигоҳдории энергияи магнитии фавқулоқии баррасӣ мешавад. Истифодаи нигоҳдории энергияи магнитии фавқулоқӣ имкон медиҳад, ки басомад тезтар танзим карда мешавад то мавриде, ки аз ҷониби генераторҳои нерӯҳои хурди барқи обӣ (SHPP) нигоҳдории басомад таъмин карда шавад.

Калидвожаҳо: комплекси энергетикӣ, ҳавзи танзими шабонарӯзӣ, энергия, офтоб, басомад, тавозун, захира, потенциал, манбаҳо.

OPTIMIZATION OF A HYBRID RENEWABLE ENERGY SYSTEM WITH ENERGY STORAGE

A.K. Kirgizov

Tajik Technical University named after Academician M.S. Osimi, Dushanbe, Republic of Tajikistan

This article examines the key issues involved in creating a hybrid power complex based on renewable energy sources in the country's mountainous regions. Due to the unpredictability of power generation from renewable energy sources, particularly solar and wind, maintaining the power and frequency balance is a primary task when creating a power complex. Currently, there are many ways to maintain the power balance of a renewable energy complex. This article discusses a method for maintaining the power balance and regulating the frequency using a diurnal response pool and superconducting magnetic energy storage. The use of superconducting magnetic energy storage enables rapid frequency maintenance before the frequency is regulated by small hydroelectric power station (SHPP) generators.

Keywords: power complex, diurnal response pool, energy, solar, frequency, balance, resource, potential, sources.

Введение

Ускорение мирового энергетического кризиса и все увеличивающийся выброс парниковых газов в атмосферу требуют кардинального подхода к использованию новых видов источников для выработки энергии. Возобновляемые источники в виде энергии солнца, ветра и других источников являются наиболее приемлемыми источниками энергии.

Эти виды энергии являются привлекательными с точки зрения экологии, но имеют один существенный недостаток, заключающийся в непостоянстве этих видов энергии во временном интервале. В Таджикистане из-за отсутствия собственных ресурсов традиционной энергии в виде нефти и газа большое предпочтение отдается использованию возобновляемой энергии. На правительственном уровне были приняты законы, которые стимулируют использование этих ресурсов [1].

Таджикистан - горная страна и 93% её территории - это горные массивы, в которых проживают около 70 % населения страны. Обеспечение населения электроэнергией особенно в горных и труднодоступных районах является приоритетной задачей, которую правительство поставило перед энергетиками. Из-за географического расположения страны потенциал энергии солнца в стране очень значительный, да и других источников предостаточно. Эти источники с точки зрения воздействия на экологию являются очень привлекательными, но с точки зрения обеспечения надёжного энергообеспечения имеют ряд недостатков. Основным недостатком является непостоянность этих источников и невозможность увеличения мощности по требованию потребителей. Для повышения уровня надёжности и доступности энергии солнца, ветра и др. в суточном интервале необходимо комбинировать их в одной системе, которая уменьшает неопределённость и увеличивает надёжность электроснабжения. Применение комбинированных гибридных систем для работы в автономном режиме и в составе существующей системы с двунаправленной интеллектуальной системой учёта является наиболее предпочтительным вариантом электроснабжения. Как показывает анализ потребления электроэнергии, с повышением уровня благосостояния оно с каждым годом будет расти, что приведет к дополнительной нагрузке на передающие сети. Создание гибридного центра позволяет подключить его к в любой точке распределённой сети или в автономном режиме. Даже создание комбинированного гибридного центра на основе ВИЭ не может обеспечивать 100%-ную надёжность энергоснабжения потребителей. Для решения этой проблемы необходимо внедрение системы аккумулирования энергии в любом его виде [2].

Схема предлагаемой системы гибридного комплекса

Для условий горных районов Таджикистана наиболее приемлемым вариантом использования ВИЭ является солнечная и гидроэнергия. Энергии ветра по всей территории Таджикистана недостаточно для широкого применения. Поэтому существующие комплексы основаны на применении энергии солнца и воды. Использование возобновляемых источников энергии наряду с преимуществом по снижению выбросов парниковых газов, снижению зависимости от полезных ископаемых имеет и ряд недостатков, связанных с метеорологическими и географическими факторами. Предлагаемый вариант комплекса включает в себя солнечную электростанцию, гидроэлектростанцию с бассейном суточного регулирования (или гидроаккумулирующую электростанцию) и сверхпроводящий накопитель магнитной энергии. Такая схема создания комплекса позволяет повысить надёжность электроснабжения потребителей [3].

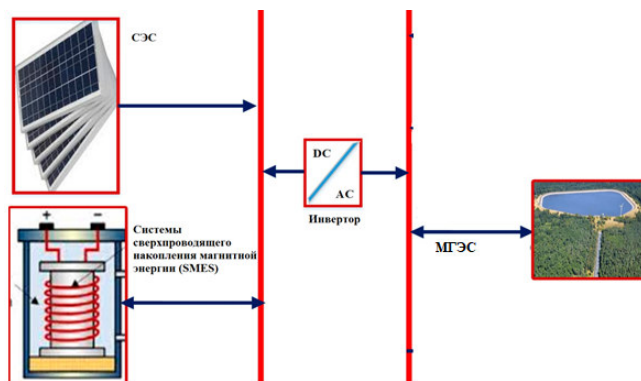


Рисунок 1 – Схема гибридного комплекса
Figure 1 – Schematic Diagram of the Hybrid Complex

Математическое моделирование каждого блока гибридного энергокомплекса

Моделирование солнечной электростанции

Солнечная электростанция состоит из большого количества солнечных панелей, соединённых между собой по принятой схеме

$$P_{\text{СЭС}}(t) = n_{\text{СЭС}} + A_{\text{СЭС}} + \eta_{\text{СЭС}} + \lambda(t) \quad (1)$$

где $n_{\text{СЭС}}$ – количество солнечных панелей;
 $A_{\text{СЭС}}$ – площадь солнечной электростанции;
 $\eta_{\text{СЭС}}$ – коэффициент полезного действия;
 $\lambda(t)$ – интенсивность солнечного излучения.

Эффективность работы солнечных станций зависит от многих внешних факторов, таких как уровень солнечного излучения, температура окружающей среды, которая действует на панель, и коэффициент полезного действия панелей. Вышеперечисленные параметры изменяются в суточном интервале и снижают выдаваемую мощность станции. КПД станций с учётом вышеприведённых воздействий можно определить по уравнению 2, где также учитывается эффективность СЭС с отслеживанием точки максимальной мощности.

$$\eta_{\text{СЭС}}(t) = \eta_{\text{Э}} \eta_{\text{ОТММ}} \times \left[1 - \beta_{\text{T}} (T_{\text{Ф}} - 25) - \beta_{\text{T}} \lambda(t) \times \left(\frac{T_{\text{T}} - 20}{800} \right) \times (1 - \eta_{\text{Э}} \eta_{\text{ОТММ}}) \right] \quad (2)$$

где, $\eta_{\text{Э}}$ – эталонный коэффициент полезного действия;
 $\eta_{\text{ОТММ}}$ – коэффициент полезного действия с отслеживанием точки максимальной мощности;
 β_{T} – температурный коэффициент;
 $T_{\text{Ф}}$ – фактическая рабочая температура;
 T_{T} – текущая температура ячейки.

Модель сверхпроводящего магнитного хранилища энергии (SMES)

Сверхпроводящее магнитное хранилище энергии является более приемлемым для гибридных систем, состоящих из ВИЭ. Такая система позволяет работать в режиме обмена энергии с сетью. Преимуществом сверхпроводящего магнитного хранилища энергии прежде всего является чрезвычайно малое время, за которое сверхпроводящая катушка способна принять или отдать накопленную в ее магнитном поле энергию. Это позволяет повысить надёжность электроснабжения потребителей и увеличить устойчивость энергетических комплексов на основе ВИЭ [4].

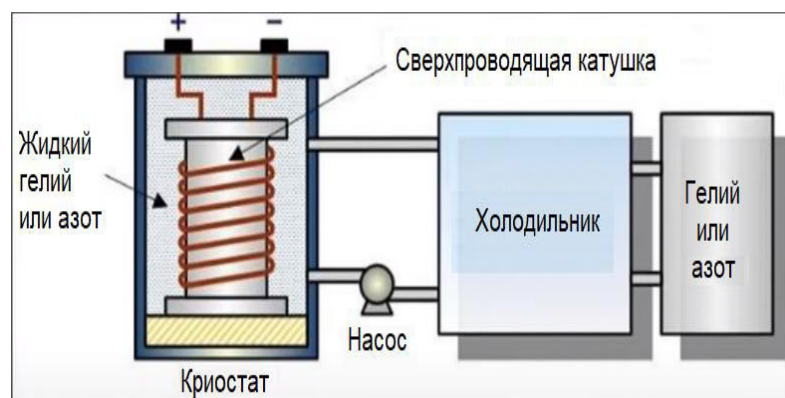


Рисунок 2 – Схема сверхпроводящего магнитного хранилища энергии
 Figure 2 – Schematic Diagram of a Superconducting Magnetic Energy Storage System

$$E_{\text{SMES}} = \frac{1}{2} L I^2 \quad (3)$$

где: L — индуктивность катушки, Г
 I — ток в катушке, А

Мощность определяется как производная энергии по времени:

$$P_{\text{SMES}} = \frac{dE}{dt} = \frac{d}{dt} \left(\frac{1}{2} L I^2 \right) = \frac{dI}{dt} L I = V I \quad (4)$$

Модель малой ГЭС с бассейном суточного регулирования

$$\frac{dV(t)}{dt} = Q_{\text{приток}}(t) - Q_{\text{расх.турб}}(t) - Q_{\text{хол.сброс}}(t) \quad (5)$$

$V(t)$ — объём воды в бассейне суточного регулирования, м³

$Q_{\text{приток}}(t)$ — приток (река), м³/с

$Q_{\text{расх.турб}}(t)$ — расход через турбину, м³/с

$Q_{\text{хол.сброс}}(t)$ — холостой сброс (обычно 0)

Моделирование инвертора

В системах, работающих от солнечных установок, преобразование постоянного тока в переменный выполняется с помощью электронного устройства - инвертора [5]. Создание модели инвертора основано на следующих выходных данных мощности:

$$P_{\text{инвертор(AC)}}(t) = (P_{\text{катуш-инвертор}}(t) + P_{\text{сол-инверт}}) * \eta_{\text{инверт}} \quad (6)$$

где, $P_{\text{инвертор(AC)}}$ — количество мощности переменного тока, которое солнечные фотоэлектрические панели и СМЭХ передают потребителям,

а $\eta_{\text{инверт}}$ — показатель эффективности работы инвертора.

В данной работе предполагается, что $\eta_{\text{инверт}}$ составляет 90% [4].

Постановка задачи

В основном, проблема систем, состоящих из солнечных и ветровых электростанций, заключается в поддержании частоты системы при различных возмущениях. В большинстве случаев системы из СЭС и ВЭС работают параллельно с МГЭС. Выработка электроэнергии от солнечных и ветровых электростанций имеет непредсказуемый характер, и изменение частоты и баланса мощности ощущается очень значительно. Поэтому быстроты регулирования частоты от МГЭС иногда недостаточно для полного поддержания частоты. Солнечные и ветроэлектростанции должны регулировать частоту в системе с помощью регулирования выдаваемой активной и реактивной мощности в систему, если они работают в составе системы.

Так как использование источников ВИЭ в нашей республике является новым трендом, технических требований и стандартов регулирования частоты в системах с ВИЭ и локальных энергокомплексах пока не существует. Мы можем использовать в работе некоторые стандарты зарубежных стран или России, которые по стандарту создания электроэнергетических инфраструктур являются идентичными с нашими условиями. Научно-технический центр единой энергетической системы ЕЭС России оформил требования к ветряным и солнечным электроэнергетическим установкам, работающим в составе энергосистемы, которые могут быть обобщены при создании требования в условиях нашей республики [5].

Таблица 1 – Значения минимальных периодов времени, в течение которых генерирующее оборудование должно работать без отключения от сети при различных отклонениях частоты от номинального уровня

Table 1 – Values of the Minimum Time Periods During Which Generating Equipment Must Remain Connected to the Grid without Disconnection at Different Frequency Deviations from the Nominal Level

№	Частота Гц	Сетевые кодексы		
		ENTSO-E	E.ON	Рекомендуемая форма задания
		Допустимое время работы		
1	46-47		-	1с
2	47-47,5		-	1 мин
3	47,5-48	30 мин	10 мин	1 мин
4	48-48,5	30 мин	20 мин	5 мин
5	48,5-49	30 мин	30 мин	5 мин
6	49-50	без. огр	без. огр	Без ограничения
7	50-50,5	без. огр	без. огр	Без ограничения
8	50,5-51	без. огр	без. огр	3 мин
9	51-51,5	30 мин	30 мин	Устанавливается заводом-изготовителем

Испытания, которые провели российские ученые на солнечных электростанциях с возможностью участия солнечных электростанций в общем первичном регулировании частоты (ОПРЧ) путём автоматического снижения выдаваемой в электрическую сеть активной мощности электростанции при увеличении частоты, показали, что статизм первичного регулирования частоты должен находиться в пределах $4\div 6\%$, а верхняя граница первичного регулирования частоты не должна превышать 50,075 Гц. Такие условия в основном соответствуют при подключении к системе [6].

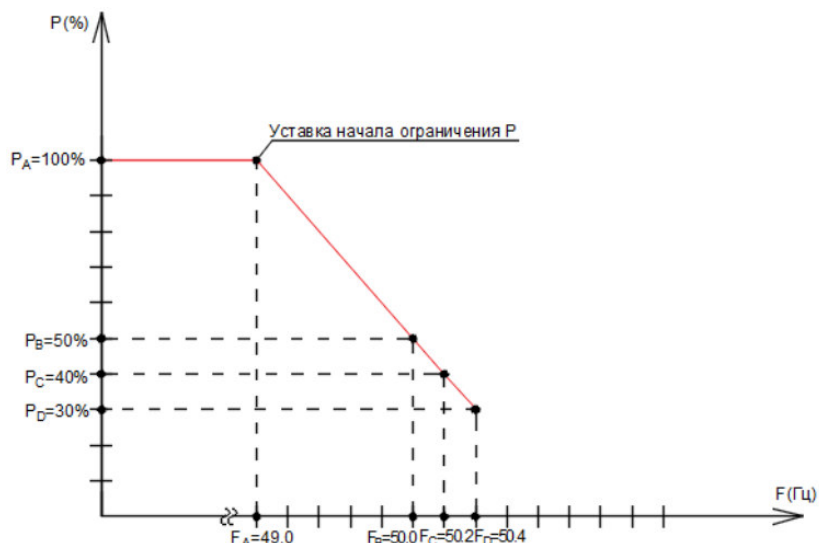


Рисунок 3 – Задаваемая характеристика функции ограничения активной мощности с уставкой по частоте 49,0 Гц; уставка по времени начала ограничения мощности – 10 секунд

Figure 3 – Specified Characteristic of the Active Power Limitation Function with a Frequency Setpoint of 49.0 Hz and a Power Limitation Start Time Delay Setting of 10 Seconds

В локальных сетях, которые состоят из источников ВИЭ, это более затруднительно из-за отсутствия дополнительных источников э.д.с., которые позволяли бы быстро регулировать частоту и поддерживать баланс мощности. В таких системах наиболее приемлемым является использование системы сверхпроводящего магнитного хранилища энергии для быстрого регулирования частоты и поддержания баланса.

Управление баланса мощности, особенно для изолированной системы:

$$\Delta P = P_{\text{МГЭС}} + P_{\text{СЭС}} + P_{\text{СМХЭ}} - P_{\text{НАГР}} \quad (7)$$

Отклонение частоты системы:

$$\frac{df}{dt} = \frac{\Delta P}{2Hf_0}$$

H — суммарная инерция системы

$$f_0 = 50 \text{ Гц}$$

СМЭХ компенсирует быстрые изменения ΔP , особенно от СЭС.

Заключение

В последние годы из-за изменения климата и меморандума о снижении выброса парниковых газов в атмосферу во всем мире наблюдается резкий скачок использования возобновляемых источников энергии. Большинство стран приняли краткосрочные и долгосрочные программы по развитию и внедрению источников ВИЭ в национальную экономику [7].

Однако одной политической воли для внедрения источников ВИЭ недостаточно. Внедрение ВИЭ в систему или создание локальных комплексов на основе ВИЭ, особенно в нашей стране требует технических стандартов и ГОСТ-ов, которые позволяют не нарушать работоспособность существующих систем и регулировать режим работы локальных систем. Основным требованием к

локальным энергокомплексам является недопустимость отключения генерирующей мощности при разных отклонениях, в особенности снижения частоты из-за нарушения баланса мощности. Предложенный выше метод гибридного комплекса и сверхпроводящего магнитного хранилища энергии для быстрого регулирования частоты и бассейна суточного регулирования для поддержания баланса является более приемлемым для наших условий.

Рецензент: Дийрзода Р.Х., к.т.н., доцент кафедры АЭТ и ЭМ ЛЭПГУ имени академика М.С. Осими

Литература

1. Киргизов, А. К. Стохастическая модель прогнозирования генерации электроэнергии солнечной фотоэлектрической панели / А. К. Киргизов // Политехнический вестник. Серия: Инженерные исследования. – 2020. – № 4(52). – С. 21–26. – EDN KULMJW.
2. Инояттов, М. Б. К вопросу об использовании малой гидроэнергетики применительно к условиям Республики Таджикистан / М. Б. Инояттов, А. К. Киргизов // Вестник Таджикского технического университета. – Душанбе: ТТУ имени акад. М. С. Осими, 2008. – № 2. – С. 38–42. – ISSN 2075 177X.
3. Andishgar, M. H. An overview of control approaches of inverter based microgrids in islanding mode of operation / M. H. Andishgar, E. Gholipour, R. A. Hooshmand // Renew. Sustain. Energy Rev. – 2017. – Vol. 80. – P. 1043–1060.
4. Gezahegn, G. T. The hybrid power generation and balancing energy supply–demand for rural village in Ethiopia / G. T. Gezahegn, S. D. Hatiye, M. T. Ayana, A. T. Ayalew, T. T. Minda // OPEC Energy Rev. – 2022. – Vol. 47. – P. 55–70.
5. Коваленко, Е. В. Гибридные энергетические комплексы с когенерацией в изолированных энергетических системах / Е. В. Коваленко, М. Г. Тягунов // Альтернативная энергетика и экология (ISJAE). – 2015. – № 10–11. – С. 167–177. – DOI: 10.15518/isjaee.2015.10 11.015.
6. Шарифов, Б. Н. Управление электромагнитными переходными процессами в системе регулирования выходными параметрами солнечной электростанции в условиях Республики Таджикистан / Б. Н. Шарифов, Р. Х. Диев, О. М. Сайфуллоева, У. У. Косимов // Политехнический вестник. Серия: Инженерные исследования. – 2022. – № 3(59). – С. 11–20. – EDN DGPJOM.
7. Исмагилов, Ф. Р. Исследование параллельной работы солнечной электростанции с сетью / Ф. Р. Исмагилов, Б. Н. Шарифов, Б. М. Гайсин, Т. Р. Тергулов, Н. Л. Бабкина // Вестник Уфимского государственного авиационного технического университета. – 2016. – № 4(74). – С. 71–79.

Reference

1. Kirgizov, A.K. Stochastic model for forecasting electricity generation from a solar photovoltaic panel / A.K. Kirgizov // Polytechnic Bulletin. Series: Engineering Research. - 2020. - No. 4 (52). - Pp. 21-26. - EDN KULMJW.
2. Inoyatov, M.B. On the issue of using small hydropower in relation to the conditions of the Republic of Tajikistan / M.B. Inoyatov, A.K. Kirgizov // Bulletin of the Tajik Technical University. - Dushanbe: TTU named after academician M.S. Osimi, 2008. - No. 2. - Pp. 38-42. - ISSN 2075-177X.
3. Andishgar, M. H. An overview of control approaches of inverter-based microgrids in islanding mode of operation / M. H. Andishgar, E. Gholipour, R.-A.Hooshmand // Renew. Sustain. Energy Rev. – 2017. – Vol.80. – P. 1043–1060.
4. Gezahegn, G. T. The hybrid power generation and balancing energy supply–demand for rural villages in Ethiopia / G. T. Gezahegn, S. D. Hatiye, M. T. Ayana, A. T. Ayalew, T. T. Minda // OPEC Energy Rev. – 2022. – Vol.47. – P. 55–70.
5. Kovalenko, E. V. Hybrid energy complexes with cogeneration in isolated energy systems / E. V. Kovalenko, M. G. Tyagunov // Alternative Energy and Ecology (ISJAE). - 2015. - No. 10-11. - P. 167-177. - DOI: 10.15518/isjaee.2015.10-11.015.
6. Sharifov, B. N. Control of electromagnetic transient processes in the control system of the output parameters of a solar power plant in the conditions of the Republic of Tajikistan / B. N. Sharifov, R. Kh. Dierov, O. M. Sayfulloeva, U. U. Kosimov // Polytechnic Bulletin. Series: Engineering Research. - 2022. - No. 3 (59). – P. 11–20. – EDN DGPJOM.
7. Ismagilov, F. R. Study of parallel operation of a solar power plant with the grid / F. R. Ismagilov, B. N. Sharifov, B. M. Gaisin, T. R. Teregulov, N. L. Babkina // Bulletin of Ufa State Aviation Technical University. – 2016. – No. 4 (74). – P. 71–79.

МАЪЛУМОТ ДАР БОРАИ МУАЛЛИФ-СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРЕ - INFORMATION ABOUT AUTHOR

TJ	RU	EN
Киргизов Алифбек Киргизович	Киргизов Алифбек Киргизович	Kirgizov Alifbek Kirgizovich
дотсент	доцент	Associate Professor
ДТТ ба номи акад. М.С. Осимӣ	ТТУ имени акад. М.С. Осими	TTU named after acad. M.S. Osimi
E.mail: alifbekkirgizov@gmail.com		
ORCID Id 0000-0001-6603-1393		

ПРИМЕНЕНИЕ МЕТАЭВРИСТИЧЕСКИХ АЛГОРИТМОВ ДЛЯ МНОГОКРИТЕРИАЛЬНОЙ ОПТИМИЗАЦИИ РАЗМЕЩЕНИЯ КОМПЕНСИРУЮЩИХ УСТРОЙСТВ С УЧЕТОМ РИСКОВ ВОЗНИКНОВЕНИЯ РЕЗОНАНСА

¹З.Х. Хабибуллозода, ²Ш.Дж. Джуразода, ¹С.Т. Исмоилов, ¹М.К. Джаборов

¹Таджикский технический университет имени академика М.С. Осими, г. Душанбе, Республика Таджикистан

²Филиал Национального исследовательского университета «Московский энергетический институт» в г. Душанбе, Таджикистан

Статья посвящена актуальной задаче оптимизации размещения компенсирующих устройств в электрических сетях с нелинейной нагрузкой. При оптимизации особое внимание уделено минимизации рисков возникновения гармонического резонанса при установке компенсирующих устройств. Представлен комплексный подход для расчета прогнозируемого коэффициента возникновения резонанса с использованием метаэвристических алгоритмов. На примере южной части энергосистемы Таджикистана проведено сравнительное исследование эффективности трех алгоритмов: метода роя частиц, метода серых волков и метода роя сальп. Результаты моделирования подтвердили преимущество алгоритма метода роя сальп, который обеспечил стабильную сходимость к глобальному оптимуму, позволив снизить потери мощности на 16,9 % и нормализовал уровни напряжения в узлах исследуемой схемы до 99,1 % от номинального напряжения и при этом строго соблюдал ограничения по возможности возникновения резонанса.

Ключевые слова: метаэвристические алгоритмы, компенсирующее устройство, метод роя сальп, резонанс, потери мощности, напряжение.

ТАТБИҚИ АЛГОРИТМҲОИ МЕТАЭВРИСТИКӢ БАРОИ ОПТИМИЗАТСИЯИ БИСӢРМЕӢӢРИИ ҶОЙГИРКУНИИ ДАСТГОҲҲОИ ҶУБРОНКУНАНДА БО НАЗАРДОШТИ ХАВҲОИ БА ВУҶУД ОМАДАНИ РЕЗОНАНС

¹З.Ҳ. Ҳабибуллозода, ²Ш.Ҷ. Ҷӯразода, ¹С.Т. Исмоилов, ¹М.К. Ҷаборов

¹Донишгоҳи техникии Тоҷикистон ба номи академик М.С. Осимӣ, ш. Душанбе, Ҷумҳурии Тоҷикистон

²Филиали Донишгоҳи миллии таҳқиқоти «Донишқадаи энергетикӣ Москва» дар шаҳри Душанбе, Тоҷикистон

Мақола ба масъалаи муҳими оптимизатсияи ҷойгиркунии дастгоҳҳои ҷубронкунада дар шабакаҳои электрикӣ дорои бори ғайрихаттӣ бахшида шудааст. Ҳангоми оптимизатсия диққати махсус ба кам намудани хавфҳои ба вучуд омадани резонанси гармоникӣ ҳангоми насби дастгоҳҳои ҷубронкунада дода шудааст. Равиши ҳамаҷониба барои ҳисоби зарифи пешгӯикунии пайдоиши резонанс бо истифода аз алгоритмҳои метаэвристикӣ пешниҳод шудааст. Дар мисоли қисми ҷанубии системаи электроэнергетикӣ Ҷумҳурии Тоҷикистон тадқиқоти муқоисавии самаранокии се алгоритм: усули тӯдаи зарраҳо, усули гурӯҳҳои хокистарӣ ва усули тӯдаи сальпҳо гузаронида шуд. Натиҷаҳои моделсозӣ бартариии алгоритми усули тӯдаи сальпҳо тасдиқ карданд, ки наздикшавии устуворро таъмин намуда, имкон дод, ки талафоти тавоноӣ 16,9 % кам карда шавад ва сатҳи шиддат дар гиреҳҳои нақшаи тадқиқшаванда то 99,1 % аз шиддати номиналӣ баланд бароварда шавад. Дар ин сурат маҳдудиятҳо вобаста ба эҳтимоли ба вучуд омадани резонанс қатъиян риоя карда шуданд.

Калидвожаҳо: алгоритмҳои метаэвристикӣ, дастгоҳи ҷубронкунада, усули тӯдаи сальпҳо, резонанс, талафоти тавоноӣ, шиддат.

APPLICATION OF METAHEURISTIC ALGORITHMS FOR MULTI-OBJECTIVE OPTIMIZATION OF COMPENSATING DEVICE PLACEMENT CONSIDERING RESONANCE RISKS

¹Z.H. Habibullozoda, ²Sh.J. Jurazoda, ¹S.T. Ismoilov, ¹M.K. Jaborov

¹Tajik Technical University named after Academician M.S. Osimi, Dushanbe, Republic of Tajikistan

²Dushanbe Branch of the National Research University "Moscow Power Engineering Institute", Dushanbe, Tajikistan

The article is devoted to the topical task of optimizing the placement of compensating devices in electrical networks with non-linear loads. During the optimization, special attention is paid to minimizing the risks of harmonic resonance when installing compensating devices. A comprehensive approach is presented, integrating the calculation of the predicted resonance occurrence coefficient into the iterative process of metaheuristic search. Using the southern part of the Tajikistan power system as an example, a comparative study of the effectiveness of three algorithms was conducted: Particle Swarm Optimization, Grey Wolf Optimizer, and Salp Swarm Algorithm. The simulation results confirmed the advantage of the Salp Swarm Algorithm, which ensured stable convergence to the global optimum, allowing for a 16,9 % reduction in power losses and normalizing the voltage levels at the nodes of the studied circuit to 99,1 % of the nominal voltage. At the same time, constraints regarding the possibility of resonance were strictly observed.

Keywords: metaheuristic algorithms, compensating device, salp swarm algorithm, resonance, power losses, voltage.

Введение

Масштабные внедрения электроприёмников с нелинейной вольтамперной характеристикой (далее «нелинейная нагрузка») в электрические сети приводят к существенному изменению электромагнитной среды электроэнергетической системы (ЭЭС). Как известно, такие электроприёмники являются источником высших гармонических составляющих тока (ВГСТ) и приводят к появлению высших гармонических составляющих напряжения (ВГСН), которые отрицательно влияют на работу основного электрооборудования и других электроприёмников с линейной вольтамперной характеристикой.

С другой стороны, в электрических сетях функционирует множество элементов, содержащих индуктивное сопротивление (трансформаторы, линии электропередачи, реакторы и другие) и ёмкостную проводимость (ёмкость между фазными проводами и земля, батарей статических конденсаторов и другие), которые как обычно соединены параллельно. В соответствии с теорией резонанса понятно, что в электрических сетях при параллельном включении RLC – элементов возникает резонанс токов [1]. Для поиска частоты, в которой возникает резонанс, необходимо построить амплитудно-частотную характеристику (АЧХ) исследуемой сети. АЧХ даёт возможность наблюдать, на какой частоте есть возможность возникновения резонанса. При наличии ВГСТ в сети и, если частота тока высших частот соответствует с частотой резонанса (или близка к резонансной частоте), увеличение величины ВГСН неизбежно и в большинстве случаев величина ВГСН превышает допустимое значение нормативного документа [2]. Поэтому в резонансных режимах величина ВГСТ и ВГСН достигает максимумов, многократно превышающих нормативные требования, что приводит к перенапряжениям (особенно на высших частот), перегреву токоведущих частей электрооборудования и, в конечном итоге, к выходу из строя оборудования. Для правильной оценки таких режимов была разработана и апробирована методика прогнозирования вероятности возникновения резонанса [3-4, 16]. Внедрение прогнозируемого коэффициента возникновения резонанса (ПКВР) позволило сопоставлять расчетные значения узловых сопротивлений на различных частотах с их допустимыми пределами и определить наиболее уязвимые узлы системы к возникновению резонанса.

Постановка задачи

Определение рисков возникновения резонанса является лишь первым этапом обеспечения надежности электроснабжения потребителей. В электрических сетях имеются узлы, в которых величина напряжения находится ниже допустимого значения нормативного документа [2] или требуемого условия работы электроприёмников, поэтому для обеспечения качества электроэнергии (КЭЭ) и снижения потерь мощности, как правило, используются компенсирующие устройства (КУ), часто именно батарей статических конденсаторов (БСК). Задача выбора мощности и места размещения БСК в распределительных сетях становится многокритериальной, так как следует одновременно минимизировать потери активной мощности (ΔP), поддерживать уровни напряжения в заданных пределах в соответствии с нормативными документами, а также избежать возможности возникновения резонанса на частотах существующих гармоник.

Существующие оптимизационные методы часто оказываются неэффективными при решении подобных задач из-за высокой размерности и нелинейности параметров электрических сетей. В настоящее время широко применяются метаэвристические оптимизационные методы, которые обладают высокой эффективностью при поиске глобального оптимума в сложных многомерных пространствах [5 – 7].

Настоящая работа посвящена развитию комплексного подхода к оптимизации мест установки и мощности КУ в электрических сетях, содержащей нелинейную нагрузку с учётом возможности возникновения резонансных явлений. Основное отличие метода рассматриваемой данной работы заключается в том, что с помощью ранее полученных результатов по оценке прогнозируемого коэффициента возникновения резонанса (ПКВР) в характерных узлах электрических сетей, содержащих нелинейные нагрузки, определяются наилучшие места установки КУ с учётом снижения потерь мощности, поддержания уровня напряжения в узлах в соответствии с [2] и вероятности

возникновения резонанса. При расчёте используются метаэвристические оптимизационные методы, такие как метод роя частиц (МРЧ), метод серых волков (МСВ) и метод роя сальп (МРС).

Объектом исследования является южная часть ЭЭС Республики Таджикистан (РТ). Граф объекта исследования приведен на рисунке 1. Исходные данные исследуемой схемы приведены в таблице 1. Исследуемая схема состоит из 9 источников (электрические станции), 4 понизительных подстанций, 20 узлов нагрузки, а также 46 воздушных линий электропередачи (ЛЭП), из которых 4 линии напряжением 500 кВ и 42 линии напряжением 220 кВ. В исследуемой схеме в узле 14 подключен мощный источник ВГСТ (Таджикская алюминиевая компания (ТАЛКО)), который генерирует ВГСТ порядка $6 \cdot n \pm 1$ (5-я, 7-я, 11-я, 13-я и т.д.). Данная нагрузка оказывает прямое влияние на спектральный состав напряжений в узлах 500 кВ и 220 кВ, создавая предпосылки для гармонического резонанса.

Современные ЭЭС содержат множество узлов и ветвей. В таких случаях целесообразно использовать матричный вид описания режимов работы электрических сетей с применением теории графов. Поэтому коротко приводим в матричном виде описание электрических сетей и теории графов.

Матричный вид описания уравнений состояния электрической сети

Конфигурацию схемы замещения ЭЭС можно отобразить в виде графа. Подробно теория графов приведена в [8]. Для произвольного графа электрической сети возможно определить матрицу соединения ветвей в узлах (M_Σ) и матрицу соединений ветвей в независимых контурах (N), служащих для обобщенного аналитического представления графа [8, 9].

Приведём краткие сведения для составления перечисленных матриц независимо от сложности конфигурации электрических сетей. Матрица соединений ветвей в узлах – это прямоугольная матрица, число строк которой должно быть равно числу вершин графа n , а число столбцов – числу рёбер m . Она обозначается следующим образом:

$$M_\Sigma = (m_{ij}), \quad i=1, 2, \dots, n; \quad j=1, 2, \dots, m. \quad (1)$$

При этом номера строк i соответствуют номерам вершин, а номера столбцов j – номерам рёбер. Элементы матрицы M_Σ могут принимать одно из трех значений: $m_{ij} = +1$, если узел i является начальной вершиной ветви j ; $m_{ij} = -1$, если узел i является конечной вершиной ветви j ; $m_{ij} = 0$, если узел i не является вершиной ветви j .

Каждая строка матрицы M_Σ показывает, какими вершинами соответствующие ветви присоединяются к данному узлу схемы; а каждый столбец – какие узлы являются начальной и конечной вершинами данной ветви, то есть в каждом столбце матрицы M_Σ будут только одна положительная и одна отрицательная единицы, а остальными элементами являются нули. Поэтому, если умножаем матрицу M_Σ на строковую единичную матрицу (n_t), получаем нулевую (строчную) матрицу, то есть:

$$n_t \cdot M_\Sigma = 0, \quad (2)$$

Таблица 1- Основные параметры исследуемой электрической схемы
Table 1 – Main Parameters of the Studied Electrical Circuit

Узлы	$U_{\text{ном}}$, кВ	Тип	P_n , МВт	$\cos \phi_n$	Ветви	$U_{\text{ном}}$, кВ	L_d , км	n_c	Марка провода
1	500	И	1995	0,85	2-3	500	50	1	АС-300
2	500	-	-	-	3-4	500	204	1	АС-300
3	500	-	-	-	3-5	500	95	2	АС-300
4	500	Н	800	0,93	13-14	220	5,6	8	АС-300
5	500	И	800	0,85	13-15	220	5,6	2	АСО-300
6	220	И	1005	0,85	13-12	220	47,5	1	АСО-300
7	220	-	-	-	9-10	220	45,5	1	АСО-300
8	220	Н	150	0,9	10-16	220	28	1	АС-300
9	220	-	-	-	9-12	220	10,9	2	АС-400
10	220	Н	125	0,92	9-11	220	8,3	2	АС-400

Окончание таблицы 1

11	220	И	400	0,85	9-8	220	26,5	1	АС-300
12	220	Н	250	0,91	8-34	220	32,2	1	АСО-300
13	220	-	-	-	34-35	220	50,2	1	АСО-300
14	220	Н	1100	0,92	35-21	220	0,7	1	АСУ-300
15	220	Н	350	0,92	21-36	220	0,5	1	АСО-300
16	220	Н	300	0,92	36-18	220	44,7	1	АС-300
17	220	Н	12	0,88	36-6	220	2,9	1	АСУ-300
18	220	И	120	0,85	6-35	220	2,5	1	АСО-300
19	220	И	600	0,85	6-37	220	66,5	1	АС-300
20	220	Н	40	0,91	6-22	220	22,1	1	АС-300
21	220	Н	64	0,92	6-24	220	33,4	1	АСО-300
22	220	Н	41	0,9	22-23	220	23,1	1	АС-400
23	220	Н	200	0,92	23-26	220	15,9	1	АС-400
24	220	Н	20	0,92	7-37	220	8	2	АС-400
25	220	Н	140	0,92	16-18	220	28,3	1	АСО-300
26	220	И	670	0,85	16-19	220	53,4	1	АС-400
27	220	И	220	0,85	34-17	220	0,3	1	АС-300
28	220	И	248	0,85	20-38	220	6	1	АС-300
29	220	Н	201	0,94	38-19	220	10	1	АС-300
30	220	Н	130	0,93	18-35	220	44,7	1	АС-300
31	220	Н	170	0,91	19-25	220	34,3	1	АС-300
32	220	Н	75	0,92	19-36	220	10	1	АС-300
33	220	Н	180	0,93	20-36	220	2,5	1	АС-300
34	220	-	-	-	24-25	220	8,9	1	АС-300
35	220	-	-	-	25-26	220	33,4	2	АС-400
36	220	-	-	-	25-29	220	56,4	2	АС-400
37	220	Н	163	0,92	26-33	220	93	2	АС-400
38	220	-	-	-	26-27	220	13,3	1	АС-400
Трансформаторы (автотрансформаторы)					27-28	220	14,3	1	АС-400
Ветви	$U_{ном}$, кВ	$S_{н}$, МВА		$n_{т}$	28-38	220	58,4	1	АСО-300
1-6	500/220	3×167		2	28-30	220	20,6	1	АС-400
2-13	500/220	3×267		3	28-32	220	49	1	АС-300
3-9	500/220	3×167		1	30-31	220	75,8	1	АС-300
5-7	500/220	3×167		2	31-33	220	77	1	АС-400
Линии электропередачи					32-33	220	29,9	1	АС-240
Ветви	$U_{ном}$, кВ	$L_{л}$, км	$n_{ц}$	Марка пр.					
1-2	500	115	2	3×АС-400					

Примечание: Н – нагрузка; И – источник; $U_{ном}$ – номинальное напряжение; P_n – номинальная активная мощность; $\cos\varphi_n$ – номинальный коэффициент мощности; S_n – номинальная полная мощность; n_m – количество трансформаторов; $L_{л}$ – длина линии электропередачи; $n_{ц}$ – количество цепей линии.

При расчётах режимов работы сети обычно расчёт производится относительно одного узла – базисного узла, поэтому матрицу M_{Σ} можно разделить на две части матрицы M_B и M . С учётом разделения матрицы M_{Σ} на две составляющие уравнение (5) принимает следующий вид:

$$[n_t] \times \begin{bmatrix} M \\ M_B \end{bmatrix} = 0, \quad (3)$$

или:

$$M_B = -n_t \cdot M. \quad (4)$$

где: M – матрица соединений для схемы без балансирующего узла; M_B – матрица соединений для балансирующего узла.

Для практических расчетов достаточно пользоваться матрицей M , которая полностью характеризует конфигурацию электрической сети.

Матрица соединений ветвей в независимые контуры – это прямоугольная матрица, число строк которой равно числу независимых контуров графа k , а число столбцов – числу ветвей m . Она обозначается следующим образом:

$$N = (n_{ij}), \quad i = 1, 2, \dots, k; \quad j = 1, 2, \dots, m. \quad (5)$$

При этом номера строк i соответствуют номерам независимых контуров, а номера столбцов j – номерам ветвей. Элементы матрицы N определяются следующим образом: $n_{ij} = +1$, если ветвь j входит в контур i и направление ветви совпадает с направлением обхода контура; $n_{ij} = -1$, если ветвь j входит в контур i , а направление ветви и обхода контура противоположны; $n_{ij} = 0$, если ветвь j не входит в контур i .

Правильность составленной матрицы N можно проверить с помощью следующего условия:

$$N \cdot M^T = 0 \quad (6)$$

где: M^T – транспонированная матрица M .

При расчетах режимов электрических сетей применяются следующие основные матрицы схем замещения [9]:

Диагональная матрица сопротивлений ветвей:

$$Z_B = \begin{bmatrix} z_1 & 0 & \dots & 0 \\ 0 & z_2 & \dots & 0 \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ 0 & 0 & \dots & z_m \end{bmatrix}. \quad (7)$$

где: m – количество ветвей схемы.

Диагональная матрица проводимостей ветвей:

$$Y = Z_B^{-1} = \begin{bmatrix} y_1 & 0 & \dots & 0 \\ 0 & y_2 & \dots & 0 \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ 0 & 0 & \dots & y_m \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1/z_1 & 0 & \dots & 0 \\ 0 & 1/z_2 & \dots & 0 \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ 0 & 0 & \dots & 1/z_m \end{bmatrix}. \quad (8)$$

3. Матрица узловых проводимостей:

$$Y = \begin{bmatrix} y_{11} & y_{12} & \dots & y_{1n} \\ y_{12} & y_{22} & \dots & y_{2n} \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ y_{1n} & y_{2n} & \dots & y_{nn} \end{bmatrix}. \quad (9)$$

где: i – я строка соответствует i – му узлу, j – й столбец – j – му узлу, а число строк и столбцов равно числу узлов схемы n . На главной диагонали располагаются собственные узловые проводимости, для которых $i = j$ и каждая из которых равна сумме проводимостей ветвей, соединенных с данным узлом (y_{ii}). Остальные элементы (для которых $i \neq j$) являются взаимными узловыми проводимостями (y_{ij}).

Матрицу узловых проводимостей также можно определить с помощью следующего выражения:

$$Y = M \cdot Y_B \cdot M^T. \quad (10)$$

Матрица узловых сопротивлений определяется путём определения обратной матрицы узловых проводимостей:

$$Z = Y^{-1}. \quad (11)$$

Приведённые формулы (1) – (11) могут быть использованы для составления матрицы, как и для основной частоты, так и для высших частот.

Матрицы M и N дают возможность записать уравнения состояния электрической цепи в матричной форме. Система взаимно независимых уравнений первого закона Кирхгофа может быть представлена в виде [9]:

$$M \cdot \dot{I} = \dot{J}, \quad (12)$$

где: $\dot{I} = (\dot{I}_i)$, $i = 1, \dots, m$; $\dot{J} = (\dot{J}_i)$, $i = 1, \dots, n-1$ – соответственно столбцы токов в ветвях и задающих токов в узлах.

Аналогичным образом определяем систему взаимно независимых уравнений напряжений второго закона Кирхгофа:

$$N \cdot \dot{U}_B = 0, \quad (13)$$

где: $\dot{U}_B = (\dot{U}_{Bi})$, $i = 1, \dots, m$ – столбец падений напряжений на ветвях сети.

Используя закон Ома в ветвях схемы замещения ($U_B = Z_B \cdot I$), запишем уравнение (12) в следующем виде:

$$N \cdot (Z_B \cdot \dot{I}) = 0, \quad (14)$$

Объединяя матричные уравнения (12) и (14) в общую систему, получим обобщенное уравнение состояния электрической сети независимо от её конфигурации и числа элементов:

$$\begin{cases} M \cdot \dot{I} = \dot{J}; \\ N \cdot Z_B \cdot \dot{I} = 0. \end{cases} \quad (15)$$

Таким образом, получаем обобщенное уравнение состояния электрической сети в матричном виде:

$$A \cdot \dot{I} = \dot{F}. \quad (16)$$

где: $A = \begin{bmatrix} M \\ N \cdot Z_B \end{bmatrix}$ и $\dot{F} = \begin{bmatrix} \dot{J} \\ 0 \end{bmatrix}$ матрицы, которые определяются в зависимости от исходных параметров режима и конфигурации электрической сети.

Обобщённое уравнение состояния электрической сети (16) можно записать как для основной частоты, так и для высших частот.

На основе предложенного метода прогнозирования резонансных явлений в электрических сетях, содержащего нелинейную нагрузку [4], была разработана программа для ЭВМ, которая определяет вероятности возникновения резонанса в электрических сетях [10].

В качестве примера приводим результаты прогнозирования возможности возникновения резонанса в южной части ЭЭС РТ по разработанной программе, граф которого приведён на рисунке 1. Исходные данные для расчёта приведены в таблице 1.

Допустимые и расчетные значения ПКВР в нормальном и послеаварийном (отключение одной цепи линии 1-2) режимах для узлов 1 – 5 приведены на [4].

На основе разработанной методики прогнозирования вероятности возникновения резонанса в электрических сетях и с целью облегчения оценки явления резонанса в сетях, отношение между узловым сопротивлением на резонансной частоте и сопротивлением на основной частоте принимаем ПКВР на гармонике порядка n [4]:

$$K_{p(n)} = \frac{Z_{y(n)}}{Z_{y(1)}} \quad (17)$$

Резонанс возникает при наличии ВГСТ, если выполняется следующее условие:

$$K_{p(n)\text{доп}} = \frac{Z_{y(n)\text{доп}}}{Z_{y(1)}} \geq K_{p(n)} \quad (18)$$

где, $Z_{y(n)\text{доп}} = U_{(n)\text{доп}}/I_{(n)\text{доп}}$ – нормативное значение узлового сопротивления для каждой гармоники порядка (n); $U_{(n)\text{доп}}$ – нормативное значение напряжения n – ой гармоники в соответствии [2]; $I_{(n)\text{доп}}$ – нормативное значение тока n – ой гармоники в соответствии с [11].

Если выполняется условие (18), тогда значение коэффициента n – ой гармонической составляющей напряжения ($K_{U(n)}$) превышает нормативное значение [2].

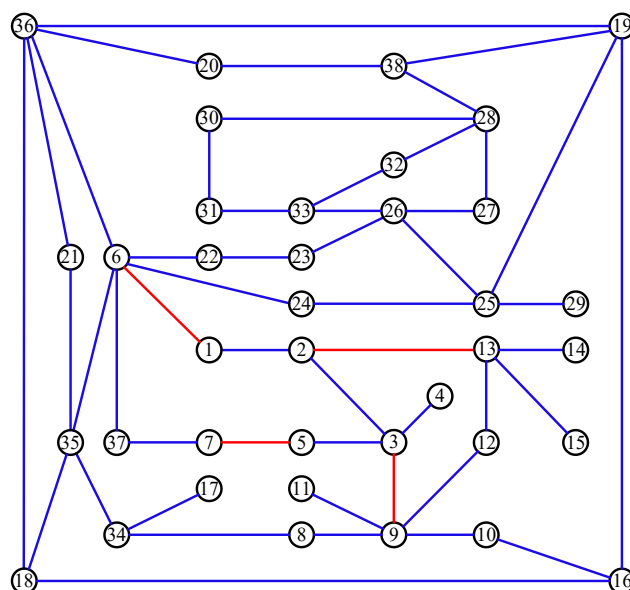


Рисунок 1 – Граф исследуемой части ЭЭС РТ

Figure 1 – Graph of the Studied Part of the Power System of the Republic of Tajikistan

Метод оптимизации для размещения КУ с учётом возможности возникновения резонанса.

Выбор метода оптимизации для размещения КУ определяется с учётом математической сложности данной задачи. В условиях современных ЭЭС данная задача является нелинейной, многокритериальной и имеет дискретно-непрерывный характер. Традиционные методы оптимизации размещения КУ обычно используются для минимизации потерь активной мощности и поддержания уровней напряжения. Если при оптимизации учитываем фактор резонанса как ограничение, структура целевой функции сильно меняется. В таком случае традиционные методы не всегда дают желаемые результаты [7]. В последние годы был разработан ряд методов и алгоритмов оптимизации для определения оптимальной мощности и места установки КУ [12 – 15]. Для снижения потерь и нормализации уровней напряжений в узлах радиальных сетей в [12] предложен двухэтапный метод, который сначала определяет приоритетные узлы с помощью коэффициентов чувствительности, а затем оптимизирует параметры батарей конденсаторов посредством гибридного алгоритма роя частиц. Эффективность данного подхода подтверждена моделированием в MATLAB на тестовых схемах IEEE, показавшим значительное улучшение уровня напряжения и уменьшения потерь мощности по сравнению с существующими методами. В работе [13] предложено использование МРЧ с использованием коэффициентов чувствительности потерь ($K_{ч.п.}$), которые используются для уменьшения области поиска основного алгоритма. Метод распространения бактерий для оптимизации места размещения КУ используется в [14]. Для определения узлов, в которых необходимо установить КУ, используется коэффициент $K_{ч.п.}$, с помощью алгоритма оптимизации муравьиной колонии определяется мощность КУ. В работе [15] представлен новый эволюционный

алгоритм для оптимизации мест размещения шунтирующих батарей конденсаторов в распределительной сети.

Таким образом, можно сделать вывод, что метаэвристические алгоритмы, такие как МРЧ (PSO), МСВ (GWO), МРС (SSA) и др. обладают рядом достоинств по сравнению с традиционными методами. В таблице 2 приведены основные преимущества метаэвристических методов по сравнению с классическими методами.

Таблица 2- Основные параметры исследуемой электрической схемы

Table 2 – Main Parameters of the Studied Electrical Circuit

Критерий сравнения	Традиционные методы	Метаэвристические методы
Поиск глобального оптимума	Часто застревают в локальных минимумах из-за нелинейности АЧХ.	Обладают механизмами выхода из локальных экстремумов (стохастический поиск).
Тип переменных	Требуют непрерывности и дифференцируемости функций.	Легко работают с дискретными (номера узлов) и целочисленными данными.
Учет резонанса	Сложно формализовать ограничения по ПКВР в аналитическом виде.	ПКВР используется напрямую как штрафная функция в алгоритме.
Чувствительность к начальной точке	Результат сильно зависит от начального приближения.	Случайная инициализация популяции обеспечивает широкое покрытие пространства поиска.

Основное отличие предлагаемого метода по сравнению с существующим методом заключается в том, что значение ПКВР, методика расчета которого подробно описана в [4], интегрируется непосредственно в итерационный процесс метаэвристического поиска. При этом в классических методах установка КУ рассматривается только для компенсации реактивной мощности на основной частоте, а метаэвристические алгоритмы позволяют проводить «частотное сканирование» каждого потенциального решения, что гарантирует, что выбранная точка установки КУ не приведет к выполнению условия возникновения резонанса (18).

Для проверки рассмотрим отличие между алгоритмами МРЧ, МСВ и МРС. Алгоритм МРЧ имитирует движение стаи птиц. Основным недостатком является высокая инерционность, из-за которой частицы часто «пролетают» мимо узких зон безопасности между резонансными пиками. Алгоритм МСВ имитирует иерархию охоты волков. Данный алгоритм лучше МРЧ, однако из-за сильного влияния трех лидеров (альфа (α), бета (β), дельта (δ)) может преждевременно сходиться, при этом игнорируя потенциально лучшие узлы сети. Алгоритм МРС является наиболее эффективным по следующим причинам: даёт высокую точность с учётом ограничений по ПКВР, наименьшая настройка параметров при расчёте и стабильная сходимость результата. Сравнение трёх рассмотренных алгоритмов приведено в таблице 3.

Таблица 3 – Сравнение алгоритмов метаэвристических методов

Table 3 – Comparison of metaheuristic algorithms

Критерий	МРЧ	МСВ	МРС
Точность обхода резонанса	Низкая (высокая инерция проскакивает границы ПКВР)	Средняя (лидеры могут «затянуть» рой в зону резонанса)	Высокая (цепочечная структура плавно огибается опасные узлы)
Параметризация	Требует настройки ω , c_1 , c_2	Требует настройки α , β , δ	Минимально (только c_1)
Сходимость	Склонность к локальным минимумам в узлах	Быстрая, но часто преждевременная	Стабильная за счёт адаптивного шага к «пище»

На основе сравнительной таблицы 3 можно сделать вывод, что МРЧ часто предлагает недопустимые решения, так как его вектор скорости не учитывает резкую границу резонанса, МСВ сужает поиск вокруг лидеров, и если α -волк оказался в локально удачном, но близком к резонансу месте, вся стая застревает там, МРС, имитируя цепочку, сохраняет гибкость, даже если лидер приблизился к границе резонанса, последователи за счет усреднения позиций остаются в безопасной зоне, позволяя алгоритму исследовать соседние узлы.

Далее рассмотрим диаграмму сходимости алгоритмов оптимизации МРЧ, МСВ и МРС.

В соответствии с диаграммой сходимости алгоритмов оптимизации (рисунок 2) видно, что самым лучшим алгоритмом по сходимости является алгоритм MPC, поэтому в дальнейшем используем данный алгоритм.

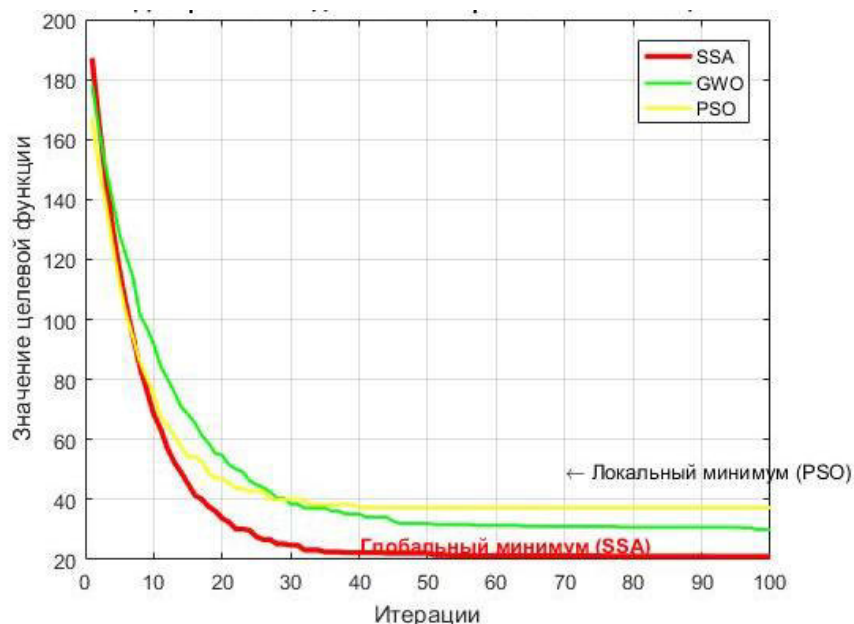


Рисунок 2- Диаграмма сходимости алгоритмов оптимизации МРЧ, МСВ и МРС
Figure 2 – Convergence curve of PSO, WOLF, and DFO optimization algorithms

Алгоритмом метода роя сальп (AMPC) (Salp Swarm Algorithm, SSA) является современный метаэвристический оптимизационный алгоритм, который впервые предложил Сейедали Мирджалил в 2017 году. Данный алгоритм имитирует социальное поведение сальп (морских беспозвоночных) во время поиска пищи в океане.

Биологическое обоснование данного алгоритма заключается в том, что сальпы образуют длинные цепи, в которых выделяют две группы особей: лидер (первая сальпа, которая направляет рой к источнику пищи) и последователи (все остальные сальпы, которые следуют друг за другом, поддерживая связность цепи). Целью данного алгоритма является нахождение глобального оптимума (источник пищи) в многомерном пространстве поиска.

Математической моделью данного алгоритма является следующее: на первом шаге задаются начальные значения, то есть количество агентов (сальп) (N), количество итераций (T), границы поиска (lb , ub) и целевая функция $f(x)$; на втором шаге создается начальная популяция, то есть задаются координаты сальп случайным образом в заданном пространстве:

$$X_i = rand(0,1) \cdot (ub - lb) + lb. \quad (19)$$

$$X_i = [x_{i1}, x_{i2}, \dots, x_{id}].$$

где, d – размерность задачи (количество узлов схемы).

Далее на третьем шаге для каждой сальпы вычисляется значение целевой функции, после чего сальп с наилучшим результатом назначается лидером «источника пищи» (F). На четвертом шаге обновляется позиция лидера, которая определяется по следующему выражению:

$$x_j^1 = \begin{cases} F_j + c_1((ub_j - lb_j) \cdot c_2 + lb_j), & \text{если } c_3 \geq 0,5, \\ F_j - c_1((ub_j - lb_j) \cdot c_2 + lb_j), & \text{если } c_3 < 0,5. \end{cases} \quad (20)$$

где, x_j^1 – координата лидера по j – му измерению;

F_j – координата источника пищи;

c_2, c_3 – случайные числа, которые колеблются в пределах от 0 до 1;

c_1 – параметр, который уменьшается с итерациями для перехода от глобального поиска к локальному:

$$c_1 = 2 \cdot e^{-\left(\frac{\Delta}{T}\right)^2}, \quad (21)$$

где, t – текущая итерация, T – максимум итераций.

Далее на пятом шаге итераций обновляется позиция последователей по формуле:

$$x_j^i = \frac{1}{2} \cdot (x_j^i + x_j^{i-1}), \quad i \geq 2. \quad (22)$$

Рассмотрим применение APC в задачах электроэнергетики, именно для оптимизации места установки компенсирующих устройств (КУ) с учётом вероятности возникновения резонанса в электрических сетях. Блок-схема алгоритма приведена на рисунке 3. Последовательность алгоритма, следующая:

1. Ввод параметров исследуемой сети, такие как матрицы соединений M и N в соответствии с (1) и (5), также параметры элементов исследуемой сети. Расчет установившегося режима исследуемой сети и определение уровня напряжения и потери мощности без учёта КУ.

2. Целевые функции: минимизация потерь в электрических сетях; нормализация уровня напряжения в узлах схемы, также учёт резонансных ограничений в виде штрафной функции по условию (18).

3. Генерация начального роя сальп: случайное распределение КУ по узлам.

4. Проверка на расчет потерь активной мощности ΔP ; уровень напряжений в узлах по критерию:

$$0,9 \cdot U_{\text{ном}} \leq U_i \leq 1,1 \cdot U_{\text{ном}}, \quad i - \text{номер узла}. \quad (23)$$

и возможность возникновения резонанса в соответствии с условием (18).

5. Построение АЧХ на основе предложенного метода и определение значения ПКВР для каждой гармоники порядка $6 \cdot n \pm 1$, генерируемых нелинейной нагрузкой.

6. Обновление лучшего решения (F). Выбор сальпы с минимальными потерями среди тех, у которых нет риска резонанса при невыполнении условия (18).

7. Обновление позиций, то есть корректировка положений лидера и всей цепочки сальп ($i = i + 1$).

8. Конец, выдача оптимальных координат установки КУ.

Пример расчёта на основе МРС

Рассмотрим в качестве примера южную часть ЭЭС РТ, приведённую на рисунке 1. Для обеспечения КЭЭ по уровню коэффициентов несинусоидальности по напряжениям (K_U и $K_{U(n)}$) в рассматриваемой схеме с учётом возможности возникновения резонанса используем алгоритм МРС.

Исходные данные и параметры алгоритма для расчёта приведены в таблице 4.

Таблица 4- Исходные данные и параметры алгоритма

Table 4 – Initial data and algorithm parameters

Размерность задачи (d)	38 узлов (поиск оптимального узла для установки КУ)
Количества сальп (N)	30
Максимальное число итерации (T)	100
Ограничение по резонансу	$K_{p(n)\text{доп}} \geq K_{p(n)}$
Целевая функция	Нормализация уровня напряжения в узлах и коэффициентов K_U и $K_{U(n)}$, минимизация потерь

Результаты итерационного процесса представлены в таблице 5.

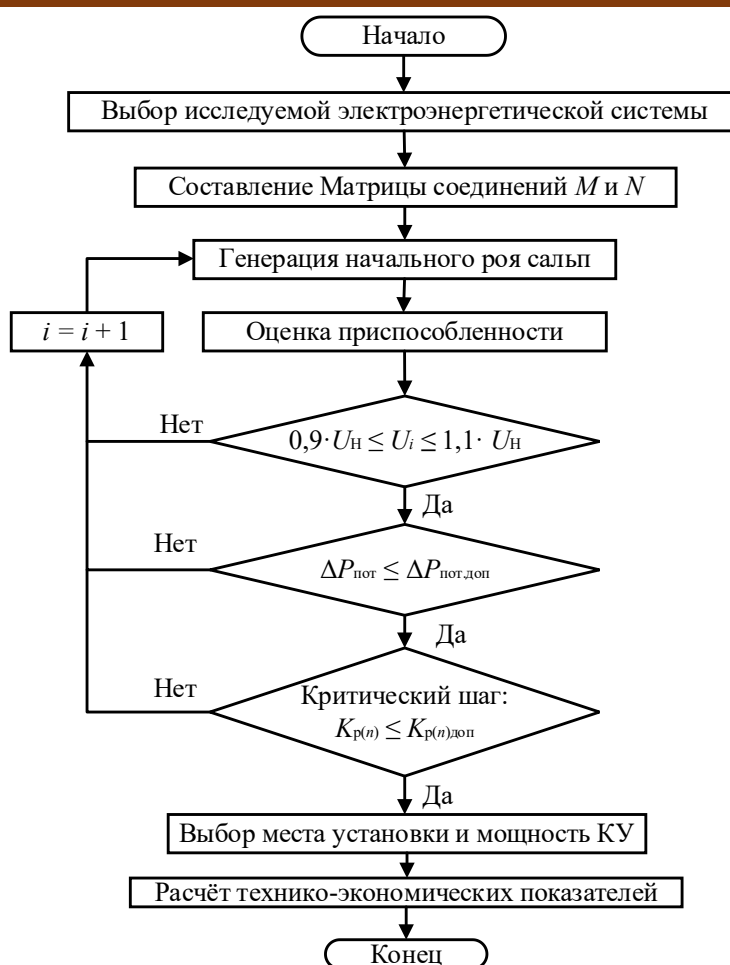


Рисунок 3 – Блок-схема алгоритма метода роя сальпы для выбора места установки КУ

Figure 3 – Flowchart of the salp swarm algorithm for capacitor placement

Таблица 5 – Результаты итерационного процесса алгоритма MPC

Table 5 – Iteration results of the Salp Swarm Algorithm

Итерация	Лидер роя (X^1)	Проверка по условию (18)	Результат
1	Узел 10, $Q_{КУ} = 50$ МВАр	Невыполнение условия в узле 5	Лидер перемещается к следующему положению
25	Узел 4, $Q_{КУ} = 25$ МВАр	Выполнение условия во всех узлах	Сальпы подтягиваются к узлу 4, сужая область поиска в его окрестности
100	Узел 4, $Q_{КУ} = 25$ МВАр	Выполнение условия во всех узлах	Коэффициент c_1 стремится к нулю, фиксируя положения роя в глобальном оптимуме

Результаты расчётов показывают, что на 25 итераций сальпы находят оптимальное место установки и мощность КУ, при этом все условия выполняются. Сравнение результатов расчёта в исходном состоянии и после оптимизации представлены в таблице 6.

Таблица 6 - Сравнение результатов расчёта в исходном состоянии и после оптимизации

Table 6 – Comparison of calculation results in the initial state and after optimization

Параметр	Исходное состояние (без КУ)	После оптимизации MPC (с КУ)
Оптимальный узел установки	–	Узел 4
Мощность КУ ($Q_{КУ}$), МВАр	0	25
Потери мощности (ΔP), МВт	14,2	11,8
Максимальное значение $K_{p(n)}$ (узел 5)	0,88	0,76
Напряжение в критическом узле, о.е.	0,945	0,991

График изменения коэффициента K_U при оптимизационном процессе представлен на рисунке 4.

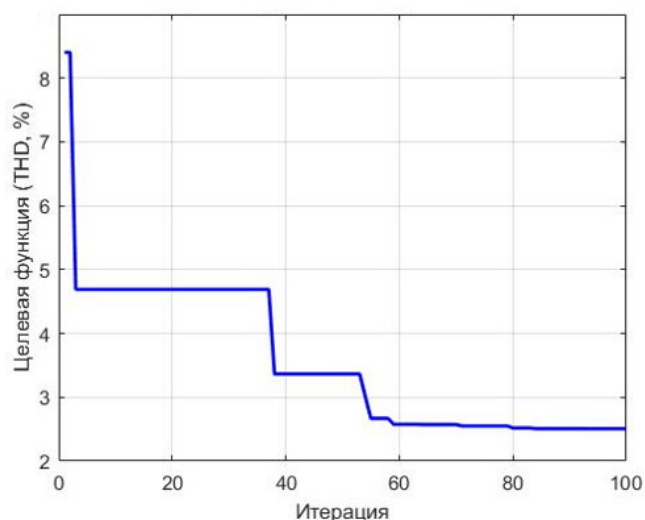


Рисунок 4 – Изменение значения коэффициента K_U при использовании MPC
Figure 4 – Variation of the K_U coefficient using the MPC

Результаты расчётов подтверждают эффективность алгоритма использования MPC для многокритериальной оптимизации размещения компенсирующих устройств с учетом рисков возникновения резонанса и дают положительный результат. По таблицам 5, 6 и графику рисунка 4 видно, что на 56 шаге итерационного процесса, все условия выполняются и алгоритм даёт желаемый результат.

Выводы

Разработана и апробирована методика многокритериальной оптимизации размещения КУ, в которой учитываются риски возникновения резонанса на частотах высших гармоник на основе АЧХ сети. Данная методика в отличие от традиционных подходов учитывает АЧХ сети и риски возникновения резонанса на частотах высших гармоник. Сравнительный анализ метаэвристических алгоритмов показал, что MPC обладает наилучшей точностью, определяет вероятности возникновения резонанса благодаря гибкой цепочечной структуре агентов и адаптивному шагу поиска, что исключает попадание системы в опасные режимы работы. Математическое моделирование режима южной части ЭЭС РТ подтвердило, что установка КУ мощностью 25 МВАр в узле 4 является оптимальным решением. Это позволило повысить напряжение в критическом узле с 94,5 до 99,1 % от номинального значения и снизить коэффициент ПКВР до безопасного уровня. Предложенный подход может быть рекомендован для использования в интеллектуальных системах управления режимами ЭЭС для обеспечения КЭЭ в условиях массового внедрения нелинейных нагрузок.

Рецензент: Киргизов А.К. – к.т.н., доцент кафедры «Электрические станции» ТПУ имени академика М.С. Осими.

Литература

1. Rizzoni, G. Fundamentals of Electrical Engineering / G. Rizzoni. – New York: McGraw-Hill Higher Education, 2009. – 726 p.
2. ГОСТ Р 32144-2013. Электрическая энергия. Совместимость технических средств электромагнитная. Нормы качества электрической энергии в системах электроснабжения общего назначения. – М.: Стандартинформ, 2013.
3. Чӯразода, Ш. Ҷ. Таҳқиқи речаи ғайрисинусоидаи дар шабакаҳои электрикӣ барои баҳодиҳии ба вучуд омадани ҳодисаи резонанс / Ш. Ҷ. Чӯразода, З. Ҳ. Ҳабибуллозода, М. К. Ҷаборов, С. Т. Исмоилов // Паёми политехникӣ. Баҳши: Таҳқиқоти муҳандисӣ. – 2025. – No. 2(70). – P. 47-58. – EDN LQLGHA.

4. Джуразода Ш.Д. Методика прогнозирования резонансных явлений в электроэнергетических системах с нелинейными нагрузками / Ш.Д. Джуразода, З.Х. Хабибуллозода, С.А. Абдулкеримов, Х.Б. Назиров, З.С. Ганиев, М.К. Джабаров // *Электричество*. – 2026. – №6. – с. 26-31.
5. Shaheen, A. M. A Review of Meta-Heuristic Algorithms for Reactive Power Planning Problem / A. M. Shaheen, S. R. Spea, S. M. Farrag, M. A. Abido // *Ain Shams Engineering Journal*. – 2018. – Vol. 9, No. 2. – Pp. 215–231.
6. Meng, K. Swarm Intelligence in Power System Planning / K. Meng, Z. Y. Dong, Y. Qiao // *International Journal of Clean Coal and Energy*. – 2013. – Vol. 2, No. 1. – Pp. 1–7.
7. Алехин Р.А. Методика прогнозирования резонансных явлений в электроэнергетических системах с нелинейными нагрузками / Р.А. Алехин, Ю.П. Кубарьков, Д.В. Замаков, Д.В. Умяров // *Вестник СГТУ. Серия: Технические науки*. – 2019. – №3(63). – с. 6-19.
8. Веников В.А. Электрические системы. Математические задачи электроэнергетики: учебник для студентов вузов. М.: Высшая школа, 1981, 288 с.
9. Джуразода Ш.Дж. Математические задачи электроэнергетики / Ш.Дж. Джуразода, Х.Б. Назиров, З.С. Ганиев, Р.С. Ишан-Ходжаев / учебно-методическое пособие. – М.: Вологда: Инфра-Инженерия, 2026. – 140 с.
10. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2025685699 Российская Федерация. Программа для анализа и определения узлов в электроэнергетической системе, где возможны резонансные явления: заявл. 04.09.2025; опубл. 25.09.2025 / З.Х. Хабибуллозода, С.А. Абдулкеримов, Ш.Д. Джуразода [и др.]; заявитель федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Национальный исследовательский университет «МЭИ». – EDN OTHGQR.
11. IEEE Std 519-1992. IEEE Recommended Practices and Requirements for Harmonic Control in Electric Power Systems. – © Institute of Electrical and Electronics Engineers, Inc., 1993. – 100 p.
12. Тульский, В.Н. Оптимальное размещение батарей конденсаторов в радиальной распределительной сети / В.Н. Тульский, А.С. Ванин, М.А.Х. Толба // *Электричество*. – 2017. – № 6. – С. 16-23. – DOI 10.24160/0013-5380-2017-6-16-23.
13. Prakash, K. Particle Swarm Optimization Based Capacitor Placement on Radial Distribution Systems / K. Prakash, M. Sydulu // *IEEE Power Engineering Society General Meeting*. – 2007. – Pp. 1–5.
14. Devabalaji, K. R. Optimal Location and Sizing of Capacitor Placement in Radial Distribution System Using Bacterial Foraging Optimization Algorithm / K. R. Devabalaji, K. Ravi, D. P. Kothari // *Electrical Power and Energy Systems*. – 2015. – Vol. 71. – Pp. 383–390.
15. Elmaouhab, A. New Evolutionary Technique for Optimization of Shunt Capacitors in Distribution Networks / A. Elmaouhab, M. Boudour, R. Gueddouche // *Journal of Electrical Engineering*. – 2011. – Vol. 26, No. 3. – Pp. 163–167.
16. Хабибуллозода, З.Х. Баррасии тахқиқоти ҳисоби резонанс дар шабакаҳои электрикӣ / З.Х. Хабибуллозода // *Паёми политехникӣ. Баҳши: Тахқиқоти муҳандисӣ*. – 2025. – No. 4(72). – P. 16-22. – DOI 10.65599/HYZM5412. – EDN GKBJCL.

Reference

1. Rizzoni, G. Fundamentals of Electrical Engineering / G. Rizzoni. – New York: McGraw-Hill Higher Education, 2009. – 726 p.
2. GOST R 32144-2013. Electrical Energy. Electromagnetic Compatibility of Technical Equipment. Standards for the Quality of Electrical Energy in General-Purpose Power Supply Systems. – М.: Standartinform, 2013.
3. Jurazoda, Sh.J. Investigation of Non-Sinusoidal Operating Conditions in Electrical Networks for Assessing the Occurrence of Resonance Phenomena / Sh.J. Jurazoda, Z.H. Habibullozoda, M.K. Jaborov, S.T. Ismoilov // *Polytechnic Bulletin. Series: Engineering Research*. – 2025. – № 2(70). – P. 47–58.
4. Dzhurazoda, Sh. D. Methodology for Predicting Resonance Phenomena in Electric Power Systems with Nonlinear Loads / Sh. D. Dzhurazoda, Z. Kh. Khabibullozoda, S. A. Abdulkarimov, H. B. Nazirov, Z. S. Ganiev, M. K. Dzhaborov // *Electricity*. – 2026. – No. 6. – Pp. 26–31.
5. Shaheen, A. M. A Review of Meta-Heuristic Algorithms for Reactive Power Planning Problem / A. M. Shaheen, S. R. Spea, S. M. Farrag, M. A. Abido // *Ain Shams Engineering Journal*. – 2018. – Vol. 9, No. 2. – Pp. 215–231.
6. Meng, K. Swarm Intelligence in Power System Planning / K. Meng, Z. Y. Dong, Y. Qiao // *International Journal of Clean Coal and Energy*. – 2013. – Vol. 2, No. 1. – Pp. 1–7.
7. Alekhine, R. A. Methodology for Predicting Resonance Phenomena in Electric Power Systems with Nonlinear Loads / R. A. Alekhine, Yu. P. Kubarkov, D. V. Zamakov, D. V. Umyarov // *Bulletin of SSTU. Series: Technical Sciences*. – 2019. – No. 3(63). – Pp. 6–19.
8. Venikov, V. A. Electrical Systems. Mathematical Problems of Electric Power Engineering: Textbook for University Students / V. A. Venikov. – Moscow: Vysshaya Shkola, 1981. – 288 p.
9. Jurazoda, Sh. D. Mathematical Problems of Electric Power Engineering / Sh. D. Jurazoda, Kh. B. Nazirov, Z. S. Ganiev, R. S. Ishan-Khodzaev. – Teaching Aid. – Vologda: Infra-Engineering, 2026. – 140 p.: ill., table.

10. Certificate of State Registration of Computer Program No. 2025685699 (Russian Federation). Program for Analysis and Determination of Nodes in the Electric Power System Where Resonance Phenomena Are Possible: declared 09/04/2025; published 09.25.2025 / Z. Kh. Khabibullozoda, S. A. Abdulkarimov, Sh. D. Jurazoda [et al.]; Applicant: Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education “National Research University ‘MPEI’”. – EDN OTHGQR.

11. IEEE Std 519-1992. IEEE Recommended Practices and Requirements for Harmonic Control in Electric Power Systems. – © Institute of Electrical and Electronics Engineers, Inc., 1993. – 100 p.

12. Tulsy, V. N. Optimal Placement of Capacitor Banks in a Radial Distribution Network / V. N. Tulsy, A. S. Vanin, M. A. Kh. Tolba // Electricity. – 2017. – No. 6. – Pp. 16–23. – DOI: 10.24160/0013-5380-2017-6-16-23.

13. Prakash, K. Particle Swarm Optimization Based Capacitor Placement on Radial Distribution Systems / K. Prakash, M. Sydulu // IEEE Power Engineering Society General Meeting. – 2007. – Pp. 1–5.

14. Devabalaji, K. R. Optimal Location and Sizing of Capacitor Placement in Radial Distribution System Using Bacterial Foraging Optimization Algorithm / K. R. Devabalaji, K. Ravi, D. P. Kothari // Electrical Power and Energy Systems. – 2015. – Vol. 71. – Pp. 383–390.

15. Elmaouhab, A. New Evolutionary Technique for Optimization of Shunt Capacitors in Distribution Networks / A. Elmaouhab, M. Boudour, R. Gueddouche // Journal of Electrical Engineering. – 2011. – Vol. 26, No. 3. – Pp. 163–167.

16. Habibullozoda, Z.H. Review of Research on Resonance Analysis in Electrical Networks / Z.H. Habibullozoda // Polytechnic Bulletin. Series: Engineering Research. – 2025. – № 4(72). – P. 16–22. – DOI: 10.65599/HYZM5412.

МАЪЛУМОТ ДАР БОРАИ МУАЛЛИФОН-СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ-INFORMATION ABOUT AUTHORS

TJ	RU	EN
Ҳабибуллозода Зикрулло Ҳабибулло	Хабибуллозода Зикрулло Хабибулло	Habibullozoda Zikrullo Habibullo
Доктор PhD	Доктор PhD	Doctor PhD
ДТТ ба номи академик М.С.Осимӣ	ТТУ имени академика М.С. Осими	TTU named after academician M.S.Osimi
E-mail: szhpei@internet.ru		
TJ	RU	EN
Ҷуразода Шохин Ҷура	Джуразода Шохин Джура	Jurazoda Shohin Jura
н.и.т., дотсенти кафедраи «Электрoэнергетика»	к.т.н., доцент кафедры электрoэнергетики	PhD (Technical Sciences), Associate Professor of the Department of Electric Power Engineering
Донишгоҳи миллии тадқиқотии «ДЭМ», филиал дар ш. Душанбе (Ҷумҳурии Тоҷикистон)	Национальный исследовательский университет «МЭИ», филиал в г. Душанбе (Республика Таджикистан)	National Research University «MPEI», branch in Dushanbe (Republic of Tajikistan)
E-mail: dzhuraevsh@mpei.ru		
TJ	RU	EN
Исмоилов Саидҷон Туронович	Исмоилов Саиджон Туронович	Ismoilov Saidjon Turonovich
н.и.т., дотсенти кафедраи асосҳои назарияи радио- ва электротехника	к.т.н., доцент кафедры «Теоретические основы радио- и электротехники»	Can.tech.scien., Associate Professor, Department of theoretical foundations of radio and electrical engineering
ДТТ ба номи академик М.С. Осимӣ	ТТУ имени академика М.С. Осими	TTU named after Academician M.S. Osimi
E-mail: said.ttu@mail.ru		
TJ	RU	EN
Ҷаборов Манучеҳр Камолович	Джаборов Манучеҳр Камолович	Jaborov Manuchehr Kamolovich
унвонҷӯ	соискатель	applicant
ДТТ ба номи академик М.С. Осимӣ	ТТУ имени академика М.С. Осими	TTU named after Academician M.S. Osimi
E-mail: manuchehrjkm@mail.ru		

УДК: 621.31

DOI: 10.65599/ENG5624

ОБОСНОВАНИЕ ВЫБОРА ОПТИМАЛЬНОГО МЕСТА УСТАНОВКИ МГЭС НА ИРРИГАЦИОННЫХ КАНАЛАХ

Ш.Х. Пирова, Ф.М. Рахимзода (Рахимов)

Таджикский технический университет имени академика М.С. Осими, г. Душанбе, Республика Таджикистан

Работа посвящена обоснованию выбора оптимального места установки малых гидроэлектростанций на ирригационном канале. Приведены общие технические показатели МГЭС на ирригационных сооружениях, количество которых в республике составляет более ста объектов. Показан расчет мощности потока воды в ирригационном канале в зависимости от скорости течения. Показаны распределения скоростей течения в зависимости от формы ирригационного сооружения. Обоснован выбор места установки гидротурбины МГЭС в ирригационном канале. Показано, что при оптимальной установке возможно получение максимальной мощности турбины за счет снижения силы сопротивления против течения вращающихся лопастей. Показан разработанный тип конструкции малой ГЭС для установки в ирригационных каналах. Подробно описан принцип взаимодействия лопастей гидротурбины с потоком воды. Работа рассмотрена применительно к условиям Республики Таджикистан.

Ключевые слова: ирригационные сооружения, канал, малые гидроэлектростанции, скорость течения, распределение скоростей течения в зависимости от формы канала.

АСОСНОККУНИИ ИНТИХОБИ МАКОНИ ОПТИМАЛӢ БАРОИ НАСБӢ КАРДАНИ НЕРӢГОҲӢИ ХУРД ДАР КАНАЛӢИ ОБӢРӢ

Ш.Х. Пирова, Ф.М. Раҳимзода (Раҳимов)

Донишгоҳи техникии Тоҷикистон ба номи академик М.С. Осимӣ, ш. Душанбе, Ҷумҳурии Тоҷикистон

Дар ин мақола асосноккунии интихоби макони оптималии насби нерӯгоҳи хурди барқӣ (НБО) дар канали обёрӣ баррасӣ мешавад. Параметрҳои умумии техникии НБО-ҳое, ки дар беш аз сад иншооти обёрии ҷумҳурӣ насб шудаанд, пешниҳод карда мешаванд. Ҳисобкунии суръати ҷараёни об дар канали обёрӣ вобаста ба суръати ҷараён пешниҳод карда мешавад. Тақсироти суръати ҷараён вобаста ба шакли сохтори обёрӣ нишон дода шудааст. Интихоби макони насби турбинаи НБО дар дохили канали обёрӣ асоснок карда шудааст. Нишон дода шудааст, ки насби оптималӣ имкон медиҳад, ки қувваи максималии турбинаро бо кам кардани қувваи кашолакунӣ, ки аз ҷониби парраҳои гардишкунанда бар зидди ҷараён ба амал меояд, ба даст оред. Тарҳи НБО-и хурде, ки барои насб дар каналҳои обёрӣ таҳия шудааст, пешниҳод карда мешавад. Принсипи таъсири мутақобилаи парраҳои турбина ва ҷараёни об муфасссал тавсиф шудааст. Мақола дар робита бо шароити Ҷумҳурии Тоҷикистон баррасӣ шудааст.

Калидвожаҳо: иншооти обёрӣ, канал, нерӯгоҳҳои хурди обӣ, суръати ҷараён, тақсироти суръати ҷараён вобаста ба шакли канал.

RATIONALE FOR SELECTING AN OPTIMAL SITE FOR INSTALLING SMALL HYDROPOWER POWER PLANTS ON IRRIGATION CANALS

Sh.Kh. Pirova, F.M. Rahimzoda (Rahimov)

Tajik Technical University named after Academician M.S. Osimi, Dushanbe, Republic of Tajikistan

This paper explores the rationale for selecting the optimal location for installing a small hydroelectric power plant (SHPP) on an irrigation canal. General technical parameters for SHPPs installed at over one hundred irrigation facilities in the republic are presented. A calculation of the water flow rate in an irrigation canal is presented, depending on the flow velocity. Flow velocity distributions are shown depending on the shape of the irrigation structure. The choice of SHPP turbine installation location within the irrigation canal is substantiated. It is demonstrated that optimal installation enables maximum turbine power to be achieved by reducing the drag force exerted by rotating blades against the flow. A design for a small HPP developed for installation in irrigation canals is presented. The principle of interaction between the turbine blades and the water flow is described in detail. The paper is considered in relation to the conditions of the Republic of Tajikistan.

Keywords: irrigation structures, canal, small hydroelectric power plants, flow velocity, flow velocity distributions depending on the shape of the canal.

Введение

Согласно Национальной Стратегии развития Республики Таджикистан на период до 2030 года в области энергетики планируется диверсификация генерирующих мощностей, а также доведение до 10% от общей установленной мощности доли возобновляемых и альтернативных источников энергии в энергобалансе страны [1-2, 7]. Наряду с развитием и строительством малых гидроэлектростанций (МГЭС) также рассматриваются вопросы вовлечения в энергобаланс республики использования потенциала ирригационных каналов [2-4]. По оценкам экспертов ранее определено более 100

ирригационных сооружений, на которых возможно сооружение МГЭС. Общие технические показатели малых ГЭС на ирригационных сооружениях приведены в таблице 1.

Таблица 1 – Общие технические показатели МГЭС на ирригационных сооружениях (каналах)

Table 1 – General technical indicators of SHPPs on irrigation facilities (canals)

Напор, м.	Количество	Общая мощность, МВт	Выработка электроэнергии, млн. кВт.ч
<10	95	32,54	119,1
10 – 20	7	4,48	16,4
20 – 50	6	9,21	33,7
> 50	6	50,90	186,3
Всего	114	97,13	355,5

Известно, что ирригационное сооружение, т.е. канал, отличается от русел малых рек. Большинство ирригационных каналов имеют известную геометрическую форму сечения (см. рис. 1)

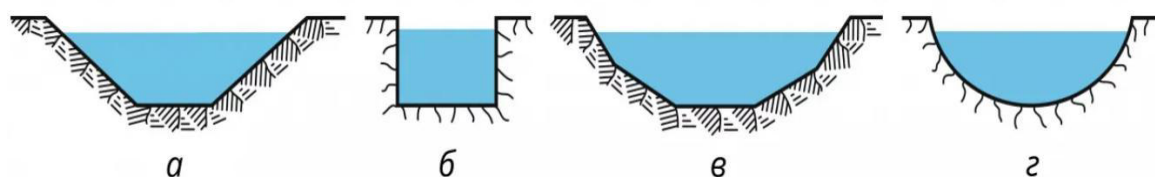


Рисунок 1 – Типы поперечных сечений ирригационных каналов:

а) трапецевидное; б) прямоугольное; в) многоугольное; г) параболическое

Figure 1 – Types of cross-sections of irrigation canals: a) trapezoidal; b) rectangular; c) polygonal; d) parabolic

Опыт строительства и использование МГЭС на ирригационных сооружениях показывает, что при строительстве применяются типовые проектные решения как в руслах рек. Такое решение является капиталоемким и малоэффективным при эксплуатации сооружения в ирригационных целях. В связи с этим возникает задача оптимального способа размещения гидротурбины в ирригационном канале, который является актуальным. Данная работа посвящена вопросу выбора оптимального места размещения гидротурбины в ирригационном канале.

Материалы и методы

При определении мощности потока в канале согласно формуле (1) основным параметром, определяющим его значение, являются скорость потока V , м/с., и “ометаемая” площадь колеса A , т.е. площадь взаимодействия гидротурбины с потоком воды.

Мощность колеса в свободном потоке можно рассчитать по известной формуле:

$$P = \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot A \cdot v^3 \cdot \eta, \quad (1)$$

где $\rho=1000 \text{ кг/м}^3$ – плотность воды; A – площадь погружной части колеса, м^2 ; v – скорость течения воды, м/с.; η – КПД водяных колес, обычно для свободно поточных систем составляет от 0,2 до 0,4.

Согласно (1) основными факторами являются скорость течения (v) и площадь погруженной части колеса (A).

Для сравнения показателей турбин на основе формулы (1) и коэффициента использования энергии потока (воды) C_p , которое для свободно поточных турбин равно 0,20-0,40, получим расчетную формулу (2).

$$P = \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot A \cdot v^3 \cdot C_p, \quad (2)$$

где ометаемая площадь S погружной части гидротурбины определяется как

$$A = D \cdot H,$$

где D – диаметр гидротурбины, м., H – высота турбины, м.

Течение потока в канале отличается от русла реки и трубы, и ее скорость зависит от уклона и поверхности дна и откосов канала. Кроме того, в зависимости от глубины воды его изменение по всей длине также влияет на скорость потока, следовательно, на энергетические показатели потока. В любом канале даже прямом существует трехмерное распределение скоростей. Хорошо известный принцип в механике жидкости гласит, что частица, находящаяся в контакте с твердой неподвижной границей, имеет нулевую скорость. На рисунке 2 приведены типичные распределения скоростей течения жидкости (воды) в открытых каналах различного профиля.

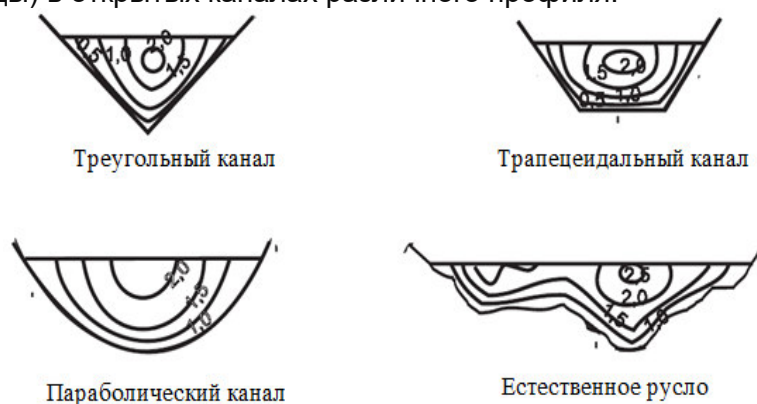


Рисунок 2 – Типичные распределения скоростей течения жидкости (воды) в открытом канале
Figure 2 – Typical flow velocity distributions of fluid (water) in an open channel

При размещении гидротурбины в канале необходимо учитывать целевое назначение канала. Поэтому необходимо размещать гидротурбину таким образом, чтобы влияние на режим функционирования ирригационного канала было минимальным.

Результаты и обсуждения

На базе кафедры «Электрические станции» Таджикского технического университета имени академика М.С. Осими разработана микрогидроэлектростанция проточного типа для выработки электрической энергии в ирригационных каналах [5], отличающаяся тем, что турбина роторного или карусельного типа полностью погружается в воду, т.е. лопасти находятся по отношению к направлению потока перпендикулярно (рис. 3).

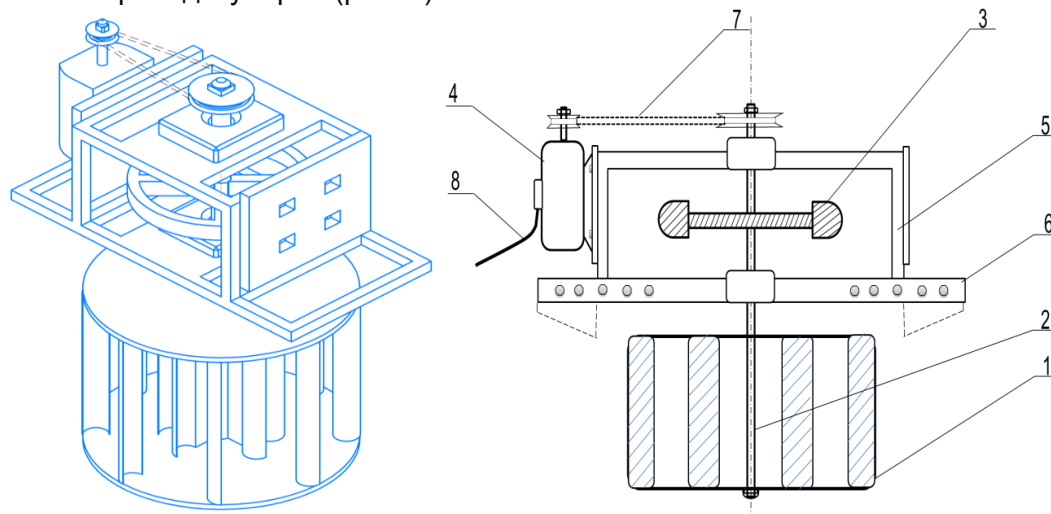


Рисунок 3 – Общий вид и разрез МГЭС проточного типа установки в ирригационных каналах: 1 – гидротурбина; 2 – вал; 3 – маховик; 4 – электрогенератор; 5 – рама; 6 – станина; 7 – ременная передача; 8 – кабельная линия
Figure 3 – General view and cross-section of a run-of-river SHPP installation in irrigation canals: 1 – hydro turbine; 2 – shaft; 3 – flywheel; 4 – electric generator; 5 – frame; 6 – bedplate (base); 7 – belt drive; 8 – cable line

На рисунке 4 приведен вариант размещения МГЭС в канале трапецеидальной формы с учетом распределения скоростей течения согласно рис. 2.

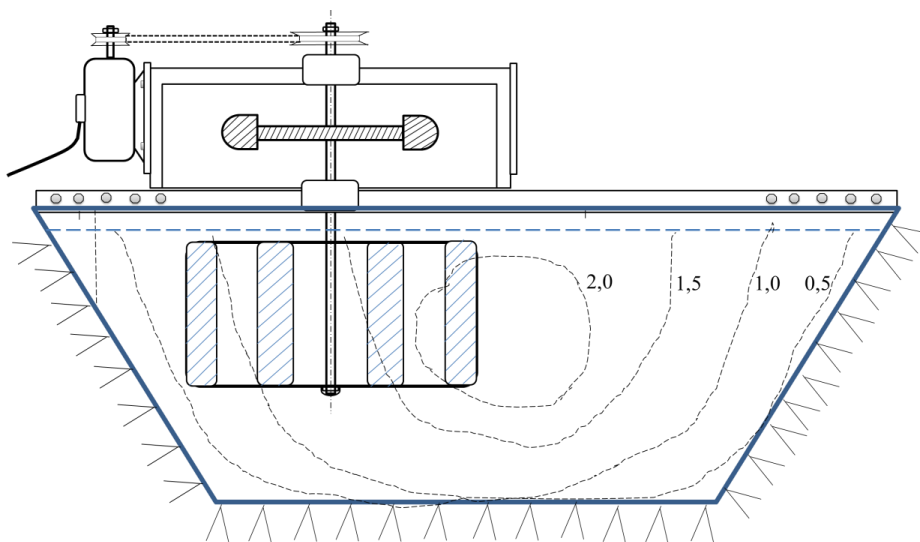


Рисунок 4 – Схема оптимального размещения гидротурбины в ирригационном канале
Figure 4 – Schematic layout for optimal hydro turbine placement in an irrigation canal

Принцип работы МГЭС объясняется следующим образом.

Габариты гидротурбины выбираются таким образом, чтобы при установке в канале была возможность его смещения в сторону одного из откосов (левый или правый). Смещение гидротурбины выполняется с целью того, чтобы половина лопастей колеса расположились в зоне высокой скорости течения, а вторая половина - в зоне низких скоростей. При взаимодействии потока с лопастями первая половина принимает энергию потока и вращается по направлению потока, а вторая половина возвращается против направления потока. Так как в половинах колеса действуют разные скорости потока воды, тогда за счёт разности скоростей, которые имеют соответственно разный потенциал энергии, снимается максимальная энергия.

Заключение

Оптимальным местом для установки гидротурбины в ирригационном канале является участок канала, который имеет ярко выраженное распределение скоростей течения.

Предложенная конструкция МГЭС проточного типа установки в ирригационных каналах является приоритетной для использования потенциала ирригационных каналов в энергобалансе Республики Таджикистан.

Известно, что ирригационные сооружения в республике достаточно хорошо развиты, и применение МГЭС, установленных на них, могут повысить надежность и качество электроснабжения вблизи расположенных маломощных потребителей электрической энергии (фермерских хозяйств и т.д.).

Рецензент: Исмоилов Ф.О. — к.т.н., доцент кафедры «Электроснабжения» ПЭПУ имени академика М.С. Осими

Литература

1. Министерство энергетики и водных ресурсов Республики Таджикистан. – [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://www.mewr.tj/> (дата обращения: 04.05.2026).
2. Пирова, Ш. Х. Перспективы использования каналов ирригационных систем в целях развития малых гидроэлектростанций на территории Республики Таджикистан / Ш. Х. Пирова, Ф. М. Рахимов // Политехнический вестник. Серия: Инженерные исследования. – 2024. – № 4(68). – С. 11–14. – EDN SWHRAG.

3. UNDP. Содействие интегрированному управлению водными ресурсами и трансграничному диалогу в Центральной Азии: проект ЕС-ПРООН (2009–2012). – [Электронный ресурс]. – Режим доступа: https://www.cawater-info.net/bk/iwrm/pdf/tj_iwrm_an_rev_rus.pdf (дата обращения: 15.05.2026).

4. Министерство энергетики и водных ресурсов Республики Таджикистан. Национальная водная стратегия Республики Таджикистан до 2040 года. – [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://www.mewr.tj/wp-content/uploads/2025/-2040.pdf>.

5. Патент РТ ТЖ 1640. Турбина для малой гидроэлектростанции / Ш. Х. Пирова, Ш. М. Султонзода, Ф. М. Рахимов, Н. С. Назаров, С. А. Рахмонзода; заявитель и патентообладатель: Ш. Х. Пирова, Ш. М. Султонзода, Ф. М. Рахимов, Н. С. Назаров, С. А. Рахмонзода. – № ТЖ 1640; заявл. 20.05.2025, № 2502101.

6. Положительное решение на получение малого патента РТ (ТЖ). Микрогидроэлектростанция проточного типа для выработки электрической энергии в ирригационных каналах / Ш. Х. Пирова, Ф. М. Рахимзода, Ш. М. Султонзода; заявитель: Ш. Х. Пирова, Ф. М. Рахимзода, Ш. М. Султонзода. – От 08.04.2026, № 2602259.

7. Рахимов, Ф. М. К вопросу интеграции водородных накопителей электроэнергии в энергосистему / Ф. М. Рахимов, О. С. Хабибов // Политехнический вестник. Серия: Инженерные исследования. – 2025. – № 1(69). – С. 17–24. – EDN SXKXJX.

Reference

1. Ministry of Energy and Water Resources of the Republic of Tajikistan. – [Electronic resource]. – Access mode: <https://www.mewr.tj/> (date of access: 04.05.2026).

2. Pirova, Sh. Kh. Prospects for the Use of Irrigation System Canals for the Development of Small Hydropower Plants in the Republic of Tajikistan / Sh. Kh. Pirova, F. M. Rakhimov // Polytechnic Bulletin. Series: Engineering Research. – 2024. – No. 4 (68). – Pp. 11–14.

3. UNDP. Promoting Integrated Water Resources Management and Transboundary Dialogue in Central Asia: EU-UNDP Project (2009–2012). – [Electronic resource]. – Access mode: https://www.cawater-info.net/bk/iwrm/pdf/tj_iwrm_an_rev_rus.pdf (date accessed: 15.05.2026).

4. Ministry of Energy and Water Resources of the Republic of Tajikistan. National Water Strategy of the Republic of Tajikistan until 2040. – [Electronic resource]. – Access mode: <https://www.mewr.tj/wp-content/uploads/2025/-2040.pdf>.

5. Patent RT TJ 1640. Turbine for a small hydroelectric power plant / Sh. Kh. Pirova, Sh. M. Sultonzoda, F. M. Rakhimov, N. S. Nazarov, S. A. Rakhmonzoda; applicant and patent holder: Sh. Kh. Pirova, Sh. M. Sultonzoda, F. M. Rakhimov, N. S. Nazarov, S. A. Rakhmonzoda. – No. TJ 1640; declared 20.05.2025, No. 2502101.

6. Positive decision on obtaining a small patent of the Republic of Tajikistan (TJ). Flow-type microhydroelectric power plant for generating electric energy in irrigation canals / Sh. Kh. Pirova, F. M. Rakhimzoda, Sh. M. Sultonzoda; applicant: Sh. Kh. Pirova, F. M. Rakhimzoda, Sh. M. Sultonzoda. – From 08.04.2026, No. 2602259.

7. Rakhimov, F. M. On the integration of hydrogen energy storage devices into the power system / F. M. Rakhimov, O. S. Khabibov // Polytechnic Bulletin. Series: Engineering Research. – 2025. – No. 1 (69). – P. 17–24.

МАЪЛУМОТ ДАР БОРАИ МУАЛЛИФОН-СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ-INFORMATION ABOUT AUTHORS

TJ	RU	EN
Пирова Шамсия Хотамовна	Пирова Шамсия Хотамовна	Pirova Shamsia Khotamovna
муаллими калон	ст. преподаватель	Senior Lecturer
ДТТ ба номи акад. М.С. Осимӣ	ТТУ имени акад. М.С. Осими	TTU named after acad. M.S. Osimi
E.mail: samsiapirova@gmail.com		
ORCID Id 0009-0008-6908-8553		
TJ	RU	EN
Раҳимзода (Раҳимов) Фирдавс Мирзоумар	Рахимзода (Рахимов) Фирдавс Мирзоумар	Rahimzoda (Rahimov) Firdavs Mirzoumar
н.и.т. дотсент	к.т.н. доцент	PhD, associate professor
ДТТ ба номи акад. М.С. Осимӣ	ТТУ имени акад. М.С. Осими	TTU named after acad. M.S. Osimi
E.mail: rm-firdavs@mail.ru		
ORCID Id 0000-0002-3962-7914		

УДК: 621.311.016.352: 621.3.014.3

DOI: 10.65599/ENG8031

АНАЛИЗ РАЗВИТИЯ УТОЧНЕННЫХ МЕТОДИК РАСЧЕТА ТОКОВ КОРОТКОГО ЗАМЫКАНИЯ С УЧЕТОМ КОМПЛЕКСА ВЛИЯЮЩИХ ФАКТОРОВ

А.Г. Каюмов, А.Р. Амонулов, М.К. Джаборов, Д.С. Аминов, Б.И. Косимов

Институт энергетики Таджикистана, р-н Кушониён, Республика Таджикистан

Проведён комплексный обзор научно-исследовательских работ, направленных на совершенствование методов расчёта токов короткого замыкания в современных электроэнергетических системах. Обоснована актуальность уточнения методик в условиях роста мощностей и внедрения сложного оборудования, указано на значительные погрешности стандартов, возникающие из-за упрощённых допущений. Проанализировано влияние ключевых факторов: качаний ротора, постоянных времени затухания, статической и динамической несинфазности синхронных генераторов, а также параметров современных кабельных линий. Рассмотрена специфика переходных процессов в установках с силовой электроникой, включая системы с нелинейными нагрузками и ветроэнергетические установки на базе машин двойного питания. Рекомендовано продолжить исследования по разработке уточнённых методик и расчётных моделей, обеспечивающих высокую точность результатов для оптимальной настройки релейной защиты, а также для снижения затрат при проектировании и замене оборудования электрических станций, сетей и систем в целом.

Ключевые слова: методика расчета токов короткого замыкания, качение ротора, статический и динамической несинфазности, синхронный генератор, машины двойного питания, ветроэнергетическая установка, погрешность расчетов.

ТАҲЛИЛИ РУШДИ УСУЛҲОИ ДАҚИҚШУДАИ ҲИСОБИ ҶАРАЁНИ РАСИШИ КҶҲОҲ БО НАЗАРДОШТИ МАҶМУӢ ОМИЛҲОИ ТАЪСИРРАСОН

А.Ғ. Қаюмов, А.Р. Амонулов, М.К. Ҷаборова, Д.С. Аминов, Б.И. Қосимов

Донишқадаи энергетикӣи Тоҷикистон, н. Кушониён, Республика Таджикистан

Шарҳи ҳамаҷонибаи корҳои илмӣ-тадқиқотӣ, ки ба тақмили усулҳои ҳисоби ҷараёнҳои расиши кӯтоҳ дар низомҳои мӯсоири электроэнергетикӣ равона шудаанд, гузаронида шуд. Зарурияти дақиқсозии усулҳо дар шароити афзоиши тавоноии ва ҷорисозии таҷҳизоти мураккаб асоснок карда шудааст, ба ҳатоғҳои назарраси стандартҳо, ки бинобар фарзияҳои соддакардашуда ба вуҷуд меоянд, ишора шудааст. Таъсири омилҳои калидӣ таҳлил карда шуд: лапишҳои ротор, доими вақти хомӯшшавӣ, ғайрифазাগии статикӣ ва динамикии генераторҳои синхронӣ, инчунин параметрҳои хатҳои кабелии мӯсир. Хусусиятҳои равандҳои гузариш дар дастгоҳҳои дорои электроникаи куввагӣ, аз ҷумла системаҳои дорои бори ғайрихаттӣ ва дастгоҳҳои бодӣ дар заминаи мошини манбаи таъминоташ дутога баррасӣ шудаанд. Тавсия дода мешавад, ки тадқиқотҳо оид ба таҳияи усулҳои дақиқ ва моделҳои ҳисоббарорӣ идома дода шаванд. Ин усулҳо дақиқии баланди натиҷаҳо барои танзими оптималии ҳифзи релей, инчунин коҳиш додани хароҷот ҳангоми лоиҳакашӣ ва иваз намудани таҷҳизоти неругоҳҳои барқӣ, шабакаҳо ва умуман низомҳои энергетикӣ таъмин менамоянд.

Калидвожаҳо: методикаи ҳисоби ҷараёни расиши кӯтоҳ, лапиши ротор, ғайрифазাগии статикӣ ва динамикӣ, генератори синхронӣ, мошини дорои гизодиҳии дукарата.

ANALYSIS OF THE DEVELOPMENT OF REFINED METHODS FOR CALCULATION OF SHORT-CIRCUIT CURRENTS TAKING INTO ACCOUNT A COMPLEX OF INFLUENCING FACTORS

A.G. Kayumov, A.R. Amonuloev, M.K. Jaborov, D.S. Aminov, B.I. Kosimov

Institute of Energy of Tajikistan, Kushoniyon District, Republic of Tajikistan

A comprehensive review of research papers aimed at improving methods for calculating short-circuit currents in modern power systems has been conducted. The study justifies the necessity of refining calculation techniques in the context of increasing power capacities and the implementation of complex equipment, highlighting significant errors in existing standards due to simplified assumptions. The impact of key influencing factors is analyzed: rotor swings, decay time constants, static and dynamic phase shifts (non-synchronism) of synchronous generators, and the parameters of modern cable lines. Furthermore, the specifics of transient processes in installations with power electronics are considered, including systems with non-linear loads and wind power plants based on doubly-fed induction machines. It is recommended to continue research into developing refined methodologies and computational models that ensure high accuracy of results for optimal relay protection settings, as well as for cost reduction during the design and replacement of electrical equipment for power plants, grids, and power systems as a whole.

Keywords: short-circuit current calculation method, rotor rolling, static and dynamic out-of-phase, synchronous generator, double-fed machines.

Введение

Исторически сложилось так, что при замене электрооборудования и проектирования, а также эксплуатации электростанций, электрических сетей среди других выполняемых расчетов или исследовательских работ переходным процессам уделяется особое внимание, особенно в анализе аварийных режимов. Одним из тяжёлых аварийных режимов являются токи коротких замыканий (КЗ) и становится критически важным в условиях непрерывного роста их уровней, вызванного концентрацией мощных источников питания в узлах среднего, высокого и сверхвысокого напряжения. На сегодняшний день из-за учета различных наборов влияющих факторов и разных методов определения токов КЗ существует ряд российских и зарубежных регламентирующих документов в

сетях до 1 кВ и выше 1 кВ [1-4, 45]. Деятельность ведущих организаций по стандартизации: Государственный стандарт Российской Федерации (ГОСТ РФ), Международная электротехническая комиссия (МЭК), Совместные стандарты, разработанные Американским национальным институтом стандартов (ANSI) и Институтом инженеров электротехники и электроники (IEEE) (ANSI/IEEE), Британский институт стандартов (BSI) и Немецкий институт по стандартизации (DIN), а также структура их документов приведены в работе [5]. Среди них автор выделяет основные четыре системы стандартов: МЭК, ANSI/IEEE, BSI и ГОСТ РФ. Описываются современные подходы к расчету токов КЗ, в частности метод эквивалентного источника напряжения, который позволяет определять начальные, ударные и установившиеся значения токов КЗ для выбора электрооборудования и настройки релейной защиты.

Следует отметить, что изначально при составлении основных алгоритмов расчета токов КЗ, согласно вышеуказанных стандартов, силовое электрооборудование преимущественно было почти однотипным, мощность большинства источников питания ограниченной, а состав потребителей электроэнергии менее разнообразным. Для упрощения решения задачи КЗ в сложных замкнутых схемах электроэнергетической системы (ЭЭС) и нелинейных дифференциальных и алгебраических уравнений в данных стандартах был принят ряд допущений. Последствия этого неизбежно влияют на точность результатов, иногда приводят к некорректным или неоправданно завышенным значениям токов КЗ. В условиях современной рыночной экономики при выборе или замене электрооборудования особое внимание уделяется материальным затратам. Техничко-экономическое обоснование проектов требует отказа от неоправданных и избыточных запасов электродинамической стойкости, статической и динамической устойчивости, а также отключающей способности коммутационных аппаратов. В связи с этим требования к методике проведения и точности результатов токов КЗ ежегодно возрастают, что подтверждает актуальность совершенствования точности расчета токов КЗ.

Целью данной статьи является обзор выполненных теоретических, научно-исследовательских и практических работ, направленных на совершенствование методов расчета путем учета различных факторов, влияющих на токи КЗ как в начальный, так и в произвольный моменты времени (рис.1).

Наиболее актуальные проблемы обеспечения точности прогнозных расчетов токов КЗ в современных электроэнергетических системах четко обозначены в работе [6]. Повсеместное использование квазистационарных методов и идеализированных допущений, закрепленных в действующих руководящих указаниях, таких как игнорирование предшествующих режимов, свободных составляющих высших гармоник, изменение скорости вращения ротора и упрощенное моделирование синхронных генераторов (СГ), приводит к значительным погрешностям при расчетах токов КЗ вблизи источников питания, а также в месте возникновения КЗ. Также подчеркивается необходимость перехода от универсальных упрощенных подходов к дифференцированному моделированию элементов сети в зависимости от конкретной технической задачи — релейной защиты, оценки коммутационной способности аппаратуры или динамической устойчивости ЭЭС рис. 1. В качестве практического решения предлагается комплексное совершенствование нормативно-методической базы и программного обеспечения в части корректного учета начальных условий, параметров регулирования напряжения и повышенных потерь в переходных режимах.



Рисунок 1 – Причины недостаточности расчетов токов КЗ

Figure 1 – Reasons for the insufficiency of short-circuit current calculations

Обзор численных методов расчета токов КЗ в современных ПК

Ряд проблем достоверности расчетов токов КЗ рассмотрен в работе [7]. Подчеркивается основная проблема неприемлемых результатов расчёта в низкой и неопределенной достоверности современных методов расчета токов КЗ, выполняемых согласно ГОСТам с помощью стандартных программно-вычислительных комплексов (ПВК). Это вызвано тем, что реальные процессы в ЭЭС описываются «жесткими» системами нелинейных дифференциальных уравнений, которые имеют трудные решения и в некоторых случаях практически не имеющие решения. Результаты исследования на примере Томской ЭЭС, полученные с помощью ПВК Всережимного моделирующего комплекса реального времени электроэнергетических систем (ВМК РВ ЭЭС), сопоставлены относительно двух ПВК: Eurostag и АРМ СРЗА, которые получили широкое использование в ЭЭС России, и выявлены их недостатки. В ПВК Eurostag часто не учитывают трансформаторную ЭДС в уравнениях статора электрических машин. Это ведет к потере апериодической составляющей тока КЗ и значительным погрешностям до 31% при расчете ударного тока КЗ рис.2. Специализированные комплексы (на примере АРМ СРЗА) используют установившиеся модели и алгебраические методы. Апериодическая составляющая тока КЗ здесь учитывается через упрощенный ударный коэффициент, что не позволяет точно моделировать происходящий процесс в реальной сложной сети. Предлагается решение гибридного подхода вместо чисто численного интегрирования (традиционный подход). Использование непрерывного неявного параллельного интегрирования уравнений, что исключает необходимость упрощения моделей. Математические переменные (напряжения) преобразуются в реальные физические токи на модельном уровне. Это позволяет достоверно воспроизводить коммутационные процессы без ограничений на размерность схемы. Погрешность расчета тока КЗ в популярных ПВК АРМ СРЗА может достигать 6–38% в зависимости от удаленности точки КЗ рис. 2.

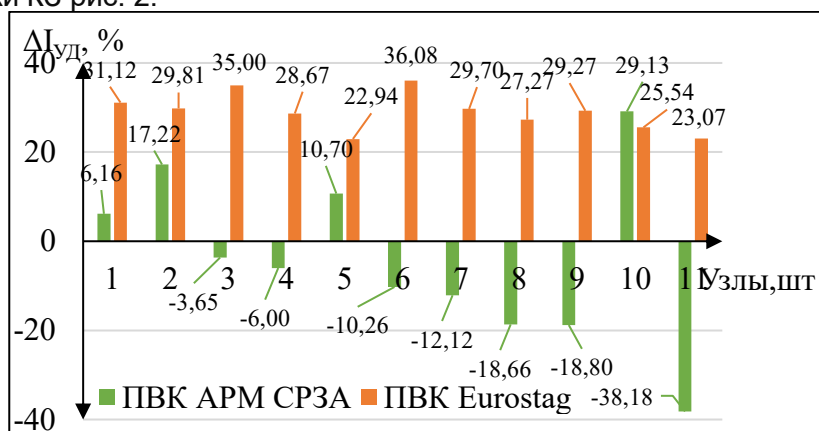


Рисунок 2 – Погрешности действующих значений ударных токов трехфазных КЗ относительно ВМК РВ ЭЭС
Figure 2 – Errors in the RMS values of three-phase short-circuit peak currents relative to the IEC/TR 60909-1 standard

Продолжая свою научную работу, была проведена верификация аварийных режимов в [8-9], включая КЗ путем сопоставления результатов расчетов ПВК с данными модельного эталона ВМК РВ ЭЭС, что позволяет выявить значительные погрешности, возникающие из-за упрощений математических моделей. Выполнено влияние параметров СГ на результаты расчетов погрешности. Путем экспериментального исследования выявлено что СГ, которые являются более манёвренными, когда их параметры в неполной мере учитываются, приводят к более значительным погрешностям. В процессе такой проверки оценена достоверность результатов ударных токов КЗ и переходных процессов. Сравнение моделирования в ВМК РВ ЭЭС с данными реальных регистраторов аварийных событий («черных ящиков») показало высокую точность — отклонение составило не более 9%.

Влияние потребления электроэнергии (нелинейных нагрузок) на токи КЗ

Другая выполненная научно-исследовательская работа [10] посвящена уточнению методики расчета симметричных токов КЗ в системах электроснабжения, например, где значительную долю составляют нелинейные нагрузки, такие как электронная преобразовательная техника. На основе использованных источников [11-15] составлены расчетные математические модели элементов ЭЭС и алгоритмов расчета токов КЗ с учетом высших гармоник. Наличие нелинейных потребителей вызывает появление высших гармоник, которые существенно влияют на параметры сети,

увеличиваются активные и индуктивные сопротивления элементов (линий, трансформаторов), изменяют условия работы вращающихся электрических машин и создают дополнительную подпитку места повреждения токами высших гармонических составляющих. Влияние нелинейных нагрузок проявляется в росте суммарного тока КЗ и необходимости учета реального доаварийного несинусоидального режима, так как игнорирование этих факторов ведет к большим погрешностям при выборе защитного оборудования и снижению надежности всей системы.

Влияние полупроводниковых преобразователей (выпрямители и инверторы) на токи КЗ на примере структуры современных автономных систем электроснабжения исследовано в работе [16]. Влияние на токи КЗ - тяговые электродвигатели оказывают возможность генерировать ток в месте повреждения на шинах звена постоянного тока через обратные диоды инвертора, при этом величина такого тока напрямую коррелирует с частотой вращения и нагрузкой двигателя [17-18]. Кроме того, наличие силового конденсатора на входе инвертора и зависимость тока КЗ от индуктивных характеристик генератора, который может работать с переменной частотой вращения, создают дополнительные сложности при определении параметров аварийных режимов в цепях постоянного тока. Проблема заключается в необходимости учета высокочастотных процессов и динамического изменения сопротивления цепи, что требует перехода от упрощенных алгебраических моделей к детальному математическому описанию переходных процессов в полупроводниковых структурах. Игнорирование влияния параметров инвертора и специфики тяговой нагрузки ведет к существенным погрешностям при определении ударных токов КЗ. Это, в свою очередь, ставит под угрозу сохранность дорогостоящей силовой электроники и литий-ионных накопителей. Таким образом, развитие методов расчета токов КЗ должно идти по пути создания специализированных моделей, учитывающих алгоритмы управления преобразователями и их поведение в критических режимах.

Обзор погрешности расчета токов КЗ из-за некорректного моделирования источников питания

Авторы [19-21] провели сравнение статических методов расчета токов КЗ, регламентированных стандартами МЭК-60909 2001 и ANSI/IEEE 37.010.1979, с результатами динамического моделирования, используя программное обеспечение Alternative Transients Program / Electromagnetic Transients Program (ATP/EMTP) для синхронных генераторов. Подчеркивается, что стандарты МЭК и ANSI/IEEE не учитывают переходные T_d' и сверхпереходные T_d'' постоянные времени по продольной оси d при неустойчивом КЗ, которые определяют поведение генераторов в первый период времени КЗ. Исследование проводилось на примере схемы, имеющей один [18] и два генератора [17], соединённых к ЭЭС через повышающий силовой трансформатор и ЛЭП. Варьировались параметры T_d'' для генератора большой мощности от 11 до 51 мс, а для генератора небольшой мощности от 3 до 9 мс. Согласно проведенному исследованию для генераторов с малыми значениями T_d'' погрешность расчетов по отношению к стандартам может превышать 40%. Для начального периода симметричного тока КЗ I_k'' погрешность расчетов составила по отношению стандарта МЭК 41,91%, а по отношению стандарта ANSI -50,37% в определенных топологиях. В случае более мощных генераторов с большими постоянными времени или при увеличении электрического расстояния до места КЗ, что эквивалентно увеличению значения T_d'' , результаты стандартов становятся относительно результатов динамического моделирования приемлемыми, соответственно погрешность значительно снижается.

Таблица 1 – Погрешности результатов расчетов токов КЗ в процентах по отношению к ATP/EMTP
Table 1 – Percentage errors of short-circuit current calculation results relative to ATP/EMTP

Место КЗ	Однофазный ударный ток КЗ на землю			Трёхфазный ударный ток КЗ			Однофазный начальный ток КЗ на землю			Трёхфазный начальный ток КЗ		
	ANSI	МЭК макс	МЭК мин	ANSI	МЭК макс	МЭК мин	ANSI	МЭК макс	МЭК мин	ANSI	МЭК макс	МЭК мин
N1	-23,8	-13	2,39	-37,2	-25,2	-8,11	-23,8	-13	2,39	-37,2	-25,2	-8,1
N2	-18,2	-6,28	3,37	-27,1	-14,3	-4,03	-18,2	-6,28	3,37	-27,1	-14,3	-4
N3	-18	-5,02	5,58	-27	-12,8	-1,67	-18	-5,02	5,58	-27	-12,8	-1,7
N4	-21,3	-3,72	9,8	-30,4	-11,2	3,25	-21,3	-3,72	9,8	-30,4	-11,2	3,25

В других выполненных работах авторами [22-25] исследуется влияние динамических характеристик генератора на распределение токов при трехфазном КЗ в наиболее простой схеме энергосистемы, подчеркивая, что нарушение баланса моментов на валу турбины-генератора вызывает электромеханический переходный процесс, выражающийся в изменении углов ротора и ЭДС генераторов. Колебания этих углов, вызванные качанием ротора, существенно влияют на характер и распределение токов, что при игнорировании данного фактора (особенно при длительном продолжении КЗ больше, чем 0,15 с) может привести к недопустимым ошибкам в расчетах КЗ. Опираясь на предшествующие исследования [21-23], в которых рассматривалось влияние качания ротора на токи КЗ в один источник системы и на общих шинах, а также расчет динамики генераторов, в работе [22] дополняется их качественным анализом более 2 источников питания в системе. Пренебрежение динамикой ротора в традиционных расчетах токов КЗ ведет к искажению относительно реальных токов КЗ, в то время как стандартные методы показывают непрерывное затухание токов, учет качания ротора выявляет их осциллирующий характер, при котором токи в отдельных ветвях могут повторно возрастать и даже значительно превышать начальные значения (например, ток в линии связи может увеличиться в 3,14 раза [22]). В то же время суммарный ток повреждения, рассчитанный как векторная сумма, зачастую оказывается ниже значений, полученных традиционными методами.

Даны оценки влияния статической несинфазности генераторов на погрешности расчета токов КЗ работе [26-29], которые в текущих стандартах не учитываются и считаются синфазными всех источников. Авторы доказывают, что пренебрежение реальным угловым сдвигом фаз между ЭДС генераторов и энергосистемы в режиме, предшествующем КЗ, ведет к методической погрешности и существенному завышению расчетных значений периодической составляющей тока КЗ вплоть до 14%. В ходе исследования на основе приведенной математической формулы в программном комплексе Mathcad была разработана математическая модель, в которой варьировались три ключевые группы параметров: режимные характеристики (активная P_g и реактивная Q_g мощности СГ, конструктивные особенности (сверхпереходные индуктивные сопротивления X_d'' различных серий гидрогенераторов) и электрическая удаленность от системы (длина линии электропередачи от 5 до 150 км) [26]. В исследовании показана прямая зависимость: рост активной мощности и увеличение электрической удаленности генератора приводят к увеличению угла расхождения фаз (несинфазности), что, в свою очередь, увеличивает методическую погрешность стандартных «скалярных» расчетов, делая векторное сложение токов необходимым для точной координации оборудования и исключения избыточных требований к его электродинамической стойкости.

Авторы [26-27], продолжая свои работы по уточнению методики расчета токов КЗ путем влияющих факторов, в работе [28-29] исследовали механическую инерцию агрегата у генераторов с малой инерцией угла мощности, которая может достигать 145 эл. град. и более, что приводит к тому, что через 0,23 с после начала КЗ подпитка от СГ прекращается (вклад становится нулевым или отрицательным), в то время как у СГ с большой инерцией снижение вклада тока за этот же период достигает 25%. Параметры обмоток ротора, характеризующиеся сверхпереходной постоянной времени T_d'' , также существенно влияют на процесс: разброс значений вклада тока СГ из-за этого параметра может достигать 15% от начального значения, так как скорость изменения токов в роторе напрямую определяет скорость роста угла мощности. Параметры обмоток статора и связанная с ними постоянная времени затухания аperiodической составляющей T_a оказывают влияние преимущественно на начальной стадии КЗ, где количественное изменение вклада тока СГ может составить до 21% от его начального значения. Таким образом, суммарное влияние динамических факторов приводит к тому, что к моменту срабатывания защиты (0,1 – 0,15 с) фаза тока СГ может отличаться от фазы тока сети на 90 и более градусов, фактически уменьшая общий ток КЗ.

Еще одной из причин недостоверности результатов может быть повсеместное использование устаревших нормативных документов и упрощенных формул из кабельных каталогов, что приводит к расчету неверных параметров сопротивления современных кабельных линий (КЛ) 6–500 кВ [30]. Использование некорректных значений прямой и нулевой последовательностей (R_1 , X_1 , R_0 , X_0), которые не учитывают схему заземления, сечение экранов и расстояние между кабелями, ведет к существенному занижению токов короткого замыкания (КЗ). В то же время применение корректных

параметров, специфичных для современных кабелей с изоляцией из сшитого полиэтилена и медными экранами, показывает, что реальные токи КЗ могут быть на 20–30% и более выше расчетных: в частности, уточнение данных может привести к росту тока трехфазного КЗ на 17%, а однофазного — на 35%.

Тенденции развития ВЭИ и их влияние на токи КЗ

В последние годы, кроме синхронных генераторов, также чаще используется машина двойного питания [31], и их характеры при переходных процессах становятся актуальными, так как они используются в ветровых электростанциях, объединённых в группы, существенно различаются и имеют обширную взаимосвязь между ветровыми электростанциями и сетью, и эти факторы усложняют анализ переходных процессов в ЭЭС, параллельно работающий с групповыми ветровыми электростанциями. Традиционные методы расчета КЗ становятся неточными для систем с высокой долей возобновляемых источников энергии из-за сложного взаимодействия между силовым оборудованием и системами управления преобразователям. В таблице 2 показаны основные типы генераторов, используемых на электростанциях, и ключевые факторы, влияющие на переходные процессы, особенно при подпитке тока к месту КЗ.

Таблица 2 – Основные типы источников питания в ВЭИ
Table 2 – Main types of power supplies in RES

Тип генератора	Ключевые факторы влияния на ток КЗ	Особенности переходного процесса	Точность традиционных моделей
Машина двойного питания (DFIG)	Параметры управления преобразователями (RSC, GSC), система ФАПЧ (PLL), стратегия LVRT.	Активное регулирование тока ротора; зависимость от глубины провала напряжения и реактивной поддержки.	Низкая (требуются уточненные аналитические модели).
Индукционный генератор (ИГ)	Изменение скольжения ротора, потокосцепления статора и ротора.	Сильная связь между индукционным током и узловым напряжением сети.	Низкая при использовании фиксированной скорости вращения.
Генератор с пост. магнитами (ГПМ)	Конструкция ротора (сегментация магнитов), отсутствие обмотки возбуждения.	Отсутствие переходных реактивностей; возможно полное смещение тока от нулевой оси.	Требуется конечно-элементное моделирование для учета размагничивания.
Асинхронный двигатель	Мощность машины (малая или крупная).	Несовпадение пиков вклада двигателя и сети не критично для общей точности.	Высокая для крупных машин; до 18% погрешности для малых.

В работе [32] предлагаются упрощенные эквивалентные модели к детальному анализу переходных процессов, который учитывает индивидуальные рабочие характеристики каждого ветропарка. Ключевыми факторами, влияющими на токи короткого замыкания в таких системах, являются характеристики контроллеров преобразователей и стратегия низковольтного сквозного управления (LVRT) [33–34]. В отличие от традиционных генераторов машина двойного питания активно регулирует ток ротора во время КЗ для поддержки напряжения в сети, что делает выходной ток КЗ зависимым от параметров управления преобразователем и глубины падения напряжения [35] на клеммах генератора, электромагнитные характеристики машины и стратегии управления преобразователями (RSC и GSC). Кроме того, на величину тока существенно влияют сильная

электромагнитная связь между ветропарками и удаленность каждого из них от точки происхождения КЗ, из-за чего их переходные процессы становятся уникальными и не могут рассматриваться как единое целое. При несимметричных КЗ для ветроэнергетических установок на базе генераторов двойного питания авторы [33] разработали уточненный метод аналитического расчета токов КЗ. Основной акцент сделан на том, что на величину и характер тока КЗ критически влияют динамика системы фазовой автоподстройки частоты (PLL/ФАПЧ), вызывающая ошибки отслеживания фазы при скачках напряжения, и алгоритмы управления преобразователем роторной цепи (RSC), включая стратегии сквозного управления при низком напряжении (LVRT). Влияющими факторами также являются глубина провала напряжения, параметры пропорционально-интегральных контроллеров системы управления и электромагнитная связь между составляющими прямой и обратной последовательностей, которые определяют наличие в токе КЗ периодических, затухающих и апериодических составляющих. В работе [34] также разработан усовершенствованный аналитический метод расчета токов КЗ в распределительных сетях с несколькими индукционными генераторами (ИГ) с фиксированной и переменной скоростью вращения, основанного на модели эквивалентного источника тока. Основными факторами, влияющими на величину и характер тока КЗ, являются изменение скольжения ротора во время аварии, которое существенно искажает расчеты при использовании упрощенных моделей с фиксированной скоростью, а также сильная связь между индукционным током генераторов и узловыми напряжениями сети, особенно при высокой доле проникновения возобновляемых источников (низком отношении мощности КЗ к мощности генератора). Кроме того, на переходные процессы влияют электромагнитные характеристики (потокосцепление статора и ротора), параметры преобразователей для генераторов с переменной скоростью и тип повреждения (симметричное или асимметричное), определяющие наличие периодических, затухающих и апериодических составляющих в токе. В работе [36] предложен улучшенный метод расчета тока короткого замыкания для ветряных турбин на базе асинхронных генераторов двойного питания (DFIG) с учетом режима непрерывного возбуждения. В отличие от предыдущих исследований, автор учитывает современные требования стандартов энергосистем (в частности, китайских), согласно которым генератор не должен отключаться при аварии, а обязан продолжать работу и выдавать реактивный ток для поддержки напряжения в сети. На основе анализа характеристик переходного эквивалентного потенциала были разработаны переходная модель и метод расчета как начального, так и установившегося значения тока короткого замыкания. Достоверность предложенного метода была подтверждена экспериментально с помощью цифро-аналоговой платформы RTDS, показавшей высокую точность расчетов (погрешность менее 3% для начального момента и менее 2% для установившегося режима).

Сравнение ударных значений токов КЗ асинхронных двигателей, полученных в результате измерений и компьютерного моделирования, с результатами расчетов по стандартам IEC и ANSI приведены в статье [37]. Исследование показало, что, несмотря на существенные различия в форме реальных волновых сигналов и упрощенных моделей, используемых в стандартах (основанных на векторах промышленной частоты), стандартизированные методы обеспечивают удивительно точные результаты для практического применения. Установлено, что погрешность расчетов по стандартам выше для двигателей малой мощности (до 14–18%), в то время как для крупных машин погрешность расчетов КЗ снижается, что подтверждает применимость традиционных инженерных методик даже в условиях сложных переходных процессов. Кроме того, авторы выяснили, что несовпадение во времени пиков вклада двигателя и энергосистемы в общий ток повреждения не оказывает критического влияния на итоговую точность расчетов.

Влияние стратегии управления поддержкой реактивной мощности на расчет токов КЗ и методы анализа КЗ для ветрогенераторов с двойным питанием (DFIG) рассматривается в работе статьи [38–41]. Традиционные методы расчетов часто игнорируют вклад реактивной мощности во время переходных процессов, ошибочно предполагая блокировку роторного преобразователя, что приводит к погрешностям. В работе предложены новая переходная модель и эквивалентная схема DFIG, учитывающая современные требования (в частности, стандарты Китая), согласно которым генератор должен активно поддерживать напряжение в сети в режиме LVRT (прохождения через провалы напряжения). Исследование, подтвержденное экспериментами на платформе RTDS,

демонстрирует, что предложенный метод расчета обладает более высокой точностью по сравнению с традиционными подходами и позволяет более корректно анализировать режимы работы энергосистем с высокой долей ветрогенерации.

Глубокому анализу процессов внезапного трехфазного КЗ в мощных синхронных генераторах с постоянными магнитами (ГПМ) посвящены работы [42,43]. Ключевое отличие ГПМ от традиционных машин с обмоткой возбуждения заключается в отсутствии переходных параметров (реактивностей и постоянных времени), что приводит к специфическим формам токов, где затухающая апериодическая составляющая тока КЗ может полностью смещать переменный ток в одну сторону от нулевой оси. Предлагается комплексный метод расчета всех необходимых параметров с использованием как быстрых аналитических подходов, так и точного конечно-элементного моделирования, которое критически важно для оценки риска размагничивания постоянных магнитов под воздействием токов повреждения. Обоснована применимость классической теории цепей к ГПМ при условии корректного определения эквивалентных параметров ротора и учета влияния его конструктивных особенностей, таких как сегментация магнитов или наличие проводящих бандажей.

На базе машины двойного питания (DFIG) в работе [43] проведен анализ тока КЗ ветрогенератора при частичных и несимметричных просадках напряжения в сети. В работе предложены аналитические выражения и эквивалентные модели прямой и обратной последовательностей для расчета токов КЗ на начальной и установившейся переходных режимов, учитывающие как электромагнитные переходные процессы в обмотках, так и динамическую реакцию системы управления преобразователем ротора. Работа преобразователя при несимметричных КЗ приводит к появлению специфического напряжения обратной последовательности в роторе, что отличает переходные процессы DFIG от традиционных генераторов. Были подтверждены полученные результаты компьютерного моделирования с физических испытаний на КЗ.

Выводы

1. Действующие нормативные регламентирующие стандарты (ГОСТ, МЭК, ANSI/IEEE) и некоторые ПВК, которые проводят расчет токов КЗ на основе этих стандартов из-за принятых допущений, часто дают существенные погрешности относительно реальных токов КЗ. Это связано с использованием упрощенных алгебраических моделей и игнорированием динамических факторов, таких как качание ротора, переходные постоянные времени генераторов и их начальные режимы работы, и влияние современной силовой электроники.

2. Массовое внедрение нелинейных нагрузок, полупроводниковых преобразователей и систем возобновляемой энергетики (ветропарков на базе DFIG, ИГ, ГПМ) делает классические методики неприемлемыми. Токи КЗ в таких системах теперь напрямую зависят не только от физических параметров машин, но и от алгоритмов управления преобразователями, работы систем фазовой автоподстройки частоты (PLL/ФАПЧ) и стратегий поддержки напряжения в сети (LVRT).

3. Для обеспечения достоверности расчетов требуется переход к более детальному моделированию элементов системы:

➤ Для кабельных линий: учет реальных схем заземления и параметров современных кабелей с изоляцией из сшитого полиэтилена может выявить токи КЗ на 20–35% выше расчетных.

➤ Для генераторов: необходим учет статической и динамической несинфазности (углового сдвига фаз ЭДС), пренебрежение которой ведет к завышению периодической составляющей тока от 14% до 24 %.

➤ Для двигателей: важен учет инерции и мощности машин, так как для двигателей малой мощности погрешности стандартов могут достигать 14–18%.

4. Современные технико-экономические обоснования требуют отказа от чрезмерных запасов прочности оборудования в пользу точных расчетов. Проведенный анализ является теоретическим фундаментом для создания уточненной методики, которая позволит избежать неоправданных запасов по электродинамической стойкости оборудования, обеспечивая при этом надежность работы всех элементов ЭЭС в целом. Рекомендуются продолжение исследований и разработок усовершенствованных методов, а также проверка результатов работы программного обеспечения с

регистраторов неисправностей, что помогает уменьшить отклонение расчетных данных от фактических КЗ.

*Рецензент: Абдуллозода Р.П. — к.т.н., доцент кафедры «Релейная защита и автоматизация энергетических систем»
ТПУ имени академика М.С. Осими*

Литература

- ГОСТ Р 52735-2007. Короткие замыкания в электроустановках. Методы расчёта в электроустановках переменного тока напряжением свыше 1 кВ.
- IEC 60909-0-2016. Short-Circuit Currents in Three-Phase A.C. Systems. Part 0: Calculation of Currents.
- ANSI/IEEE Std. C37.010. IEEE Application Guide for AC High-Voltage Circuit Breakers Rated on a Symmetrical Current Basis. – 2016.
- ANSI/IEEE Std. C37.13-1981. IEEE Standard for Low-Voltage AC Power Circuit Breakers Used in Enclosures.
- Абдурахманов, А. М. Анализ зарубежной нормативно-технической документации и практических рекомендаций по расчёту и координации токов короткого замыкания в электрических сетях / А. М. Абдурахманов // Электротехника: сетевой электронный научный журнал. – 2016. – Т. 3, № 2. – С. 3–23.
- Ковалёв, Б. И. Основные причины недостаточной точности и задачи повышения качества расчётов токов короткого замыкания в электрических системах / Б. И. Ковалёв // Токи короткого замыкания в энергосистемах: тезисы докладов Всероссийской конференции / под общ. ред. А. Ф. Дьякова. – М.: РАО «ЕЭС России», 1995. – С. 8–11.
- Суворов, А. А. Проблема достоверности расчётов токов коротких замыканий в электроэнергетических системах и средства их всережимной верификации / А. А. Суворов, А. С. Гусев, М. В. Андреев, С. А. Ставицкий // Известия Российской академии наук. Энергетика. – 2018. – № 2. – С. 13–25.
- Суворов, А. А. Всережимная верификация расчётов при анализе динамической устойчивости электроэнергетических систем / А. А. Суворов, А. С. Гусев, М. В. Андреев, А. Б. Аскаров // Электричество. – 2020. – № 11. – С. 28–37. – DOI: 10.24160/0013-5380-2020-11-28-37.
- Глебов, И. А. Методика обработки опытных данных внезапного трёхфазного короткого замыкания гидрогенератора / И. А. Глебов, Е. Ф. Харламова // Известия РАН. Энергетика. – 1999. – № 3. – С. 153–157.
- Савина, Н. В. Учёт нелинейных нагрузок при расчёте коротких замыканий / Н. В. Савина, Ю. В. Мясоедов, Л. А. Мясоедова, И. Г. Подгурская // Вестник Амурского государственного университета. Серия: Естественные и экономические науки. – 2014. – Вып. 65. – С. 63–72.
- Горев, А. А. Переходные процессы синхронной машины / А. А. Горев; отв. ред. М. Л. Левинштейн, Л. А. Суханов. – 2-е изд., доп. – Л.: Наука: Ленингр. отд-ние, 1985. – 502 с.
- Гамазин, С. И. Переходные процессы в системах промышленного электроснабжения, обусловленные электродвигательной нагрузкой / С. И. Гамазин, В. А. Ставцев, С. А. Цырук. – М.: Изд-во МЭИ, 1997. – 424 с.
- Жежеленко, И. В. Высшие гармоники в системах электроснабжения промпредприятий: учебник для вузов по специальности «Электроснабжение» / И. В. Жежеленко. – 4-е изд., перераб. и доп. – М.: Энергоатомиздат, 2000. – 331 с.: ил. – ISBN 5-283-0319-8.
- Руководящие указания по расчёту токов короткого замыкания и выбору электрооборудования / под ред. Б. Н. Неклепаева. – М.: НЦ ЭНАС, 2002. – 152 с.
- Сивокобыленко, В. Ф. Переходные процессы в многомашинных системах электроснабжения электрических станций: учеб. пособие / В. Ф. Сивокобыленко. – Донецк: Донецкий политехнический институт, 1984. – 116 с.
- Дубовик, Д. В. Теоретические аспекты и проблемы расчёта токов короткого замыкания системы электроснабжения тягового электропривода активного полуприцепа / Д. В. Дубовик, Т. В. Голубчик, А. С. Дьяков, Р. А. Закиров // Вестник Южно-Уральского государственного университета. Серия: Машиностроение. – 2023. – Т. 23, № 4. – С. 5–20. – DOI: 10.14529/engin230401.
- Николаев, А. А. Алгоритм расчёта начальных значений токов короткого замыкания и остаточных напряжений при параллельной и раздельной работе для собственной электростанции металлургического предприятия.
- Григорьев, А. В. Теоретические вопросы расчёта токов короткого замыкания в судовых электроэнергетических системах с распределением электроэнергии на постоянном токе / А. В. Григорьев, А. Ю. Васильев, Ю. А. Кулагин // Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова. – 2017. – Т. 9, № 5. – С. 1095–1103.
- Papadopoulos, T. A. Static and Dynamic Calculation of Short-Circuit Currents in Synchronous Generators / T. A. Papadopoulos, Ch. G. Kalaoudas, P. N. Papadopoulos, A. G. Marinopoulos, G. K. Papadiannis // International Conference on Power Systems Transients (IPST2011), Delft, the Netherlands, 14–17 June 2011.
- Kaloudas, C. G. Short-Circuit Analysis of an Isolated Generator and Comparative Study of IEC, ANSI and Dynamic Simulation / C. G. Kaloudas, P. N. Papadopoulos, T. A. Papadopoulos, A. G. Marinopoulos, G. K. Papagiannis // 7th Mediterranean Conference and Exhibition on Power Generation, Transmission, Distribution and Energy Conversion (MedPower 2010), Agia Napa, 2010. – Pp. 1–7. – DOI: 10.1049/cp.2010.0922.

21. Berizzi, A. Short-Circuit Current Calculation: a Comparison Between Methods of IEC and ANSI Standards Using Dynamic Simulation as Reference / A. Berizzi, A. Silvestri, D. Zaninelli, S. Massucco // Conference Record of the 1993 IEEE Industry Applications Conference. Twenty-Eighth IAS Annual Meeting, Toronto, ON, Canada, 1993. – Pp. 1420–1427, vol. 2. – DOI: 10.1109/IAS.1993.299168.
22. Stojanovic, D. Generator Dynamics Influence on Currents Distribution in Fault Condition / D. Stojanovic, J. Nahman, M. Veselinovic // 10th Mediterranean Electrotechnical Conference. Information Technology and Electrotechnology for the Mediterranean Countries (MeleCon 2000), Lemesos, Cyprus, 2000. – Pp. 1047–1050, vol. 3. – DOI: 10.1109/MELCON.2000.879714.
23. Stojanovic, D. Influence of Relative Rotor Swing to Short-Circuit Currents / D. Stojanovic, N. Mitrovic, M. Veselinovic // Conference Juko-Cigre, R23-05, Vrnjacka Banja, May 1995. (на сербском языке).
24. Stojanovic, D. Influence of Relative Swing to Short-Circuit Currents / D. Stojanovic, M. Veselinovic // UPEC'96, Iraklio, Crete, Greece, 1996. – Vol. 3. – Pp. 1016–1019.
25. Stojanovic, D. P. Calculation and Analysis of Generator Dynamics Influence on Short Circuit Current / D. P. Stojanovic, J. M. Nahman, M. O. Veselinovic // MELECON'98. 9th Mediterranean Electrotechnical Conference, Tel-Aviv, Israel, 1998. – Pp. 1131–1134, vol. 2. – DOI: 10.1109/MELCON.1998.699409.
26. Гусев, Ю. П. Учёт несинфазности генераторов при расчётах токов в начальный момент короткого замыкания / Ю. П. Гусев, А. Г. Каюмов, В. В. Говорин // Вестник Московского энергетического института. Вестник МЭИ. – 2019. – № 4. – С. 11–17. – DOI: 10.24160/1993-6982-2019-4-11-17.
27. Kayumov, A. G. Influence of Out-of-Phase of Synchronous Generators on Short-Circuit Currents in Power Systems / A. G. Kayumov, Y. P. Gusev, V. V. Govorin // 2018 International Ural Conference on Green Energy (UralCon), Chelyabinsk, Russia, 2018. – Pp. 107–113. – DOI: 10.1109/URALCON.2018.8544340.
28. Гусев, Ю. П. Влияние динамической несинфазности синхронных генераторов на токи коротких замыканий в электроэнергетических системах / Ю. П. Гусев, А. Г. Каюмов // Электричество. – 2021. – № 3. – С. 26–32. – DOI: 10.24160/0013-5380-2021-3-26-32.
29. Гусев, Ю. П. Влияние систем возбуждения синхронных генераторов на несинфазность токов короткого замыкания в электроэнергетической системе / Ю. П. Гусев, А. Г. Каюмов, В. В. Говорин // Релейная защита и автоматизация. – 2019. – № 3. – С. 30–33.
30. Дмитриев, М. В. Токи короткого замыкания в электрических сетях, содержащих современные кабельные линии 6–500 кВ / М. В. Дмитриев // Электроэнергия. Передача и распределение. – 2023. – № 3(78). – С. 82–86.
31. Косимов, Б. И. Применение асинхронизированных синхронных генераторов в качестве альтернативных источников электроэнергии для малых и средних рек / Б. И. Косимов, Н. С. Шарбатов, Д. С. Аминов [и др.] // Политехнический вестник. Серия: Инженерные исследования. – 2026. – № 1(73). – С. 28–34. – DOI: 10.65599/ENG3328. – EDN KXWHTF.
32. Faria, V. The Influence of Field Voltage Variation in the Sudden Three-Phase Short-Circuit Test. Parameter Estimation of Synchronous Machines Considering Field Voltage Variation During the Sudden Short-Circuit Test. – November 2018.
33. Faria, V. A. D. Parameter Estimation of Synchronous Machines Considering Field Voltage Variation During the Sudden Short-Circuit Test / V. A. D. Faria, J. V. Bernardes, E. C. Bortoni // International Journal of Electrical Power & Energy Systems. – 2020. – Vol. 114. – Art. 105421. – ISSN 0142-0615. – DOI: 10.1016/j.ijepes.2019.105421.
34. Wang, H. Simulation of Three-Phase Short Circuit Electromagnetic Transient Process of Synchronous Generator / H. Wang // Vibroengineering PROCEDIA. – 2020. – Vol. 35. – Pp. 33–38. – DOI: 10.21595/vp.2020.21800.
35. Yin, J. A New Short-Circuit Current Calculation and Fault Analysis Method Suitable for Doubly Fed Wind Farm Groups / J. Yin, W. Qian, X. Huang // Sensors. – 2023. – Vol. 23. – Art. 8372. – DOI: 10.3390/s23208372.
36. Zhang, L. Analytical Calculation of Stator Short Circuit Current of DFIG Considering PLL Dynamics Under Asymmetric Fault / L. Zhang, S. Li, S. Xu, X. Zhou, S. Li, Q. Xu, J. Shen, W. Zhao, J. Song, T. Wang // Energy Reports. – 2025. – Vol. 14. – Pp. 3547–3562. – ISSN 2352-4847. – DOI: 10.1016/j.egyr.2025.10.027.
37. Zhou, N. Short-Circuit Calculation in Distribution Networks with Distributed Induction Generators / N. Zhou, F. Ye, Q. Wang, X. Lou, Y. Zhang // Energies. – 2016. – Vol. 9. – Art. 277. – DOI: 10.3390/en9040277.
38. Li, J. Short-Circuit Current Calculation and Harmonic Characteristic Analysis for a Doubly-Fed Induction Generator Wind Turbine Under Converter Control / J. Li, T. Zheng, Z. Wang // Energies. – 2018. – Vol. 11. – Art. 2471. – DOI: 10.3390/en11092471.
39. Yin, J. Improved Short-Circuit Current Calculation of Doubly Fed Wind Turbines With Uninterrupted Excitation / J. Yin // Frontiers in Energy Research. – 2021. – Vol. 9. – Art. 686138. – DOI: 10.3389/fenrg.2021.686138.
40. Sorrentino, E. Comparison Between Peak Values of Induction Motor Currents' Waveforms During Nearby Three-Phase Short-Circuits and Results From Standardized Calculations / E. Sorrentino, A. Vera // IET Generation, Transmission & Distribution. – 2023. – Vol. 17, No. 7. – Pp. 1400–1408. – DOI: 10.1049/gtd2.12746.

41. Yin, J. Influence of Reactive Power Support Control Strategy on Short-Circuit Current Calculation and Fault Analysis Method of DFIG / J. Yin // *Energy Reports*. – 2021. – Vol. 7. – Pp. 5933–5942. – ISSN 2352-4847. – DOI: 10.1016/j.egyr.2021.09.008.

42. Klontz, K. W. Short-Circuit Analysis of Permanent-Magnet Generators / K. W. Klontz, T. J. E. Miller, M. I. McGilp, H. Karmaker, P. Zhong // *IEEE Transactions on Industry Applications*. – 2011. – Vol. 47, No. 4. – Pp. 1670–1680. – DOI: 10.1109/TIA.2011.2154370.

43. Гулов, Д. Ю. Выявление межвитковых замыканий в обмотке синхронного генератора / Д. Ю. Гулов, А. М. Давлатов, Н. Х. Одинаев [и др.] // *Политехнический вестник. Серия: Инженерные исследования*. – 2026. – № 1(73). – С. 35–42. – DOI: 10.65599/ENG6423. – EDN BFLWFR.

Reference

1. GOST R 52735-2007. Short-Circuits in Electrical Installations. Calculation Methods for AC Electrical Installations with Voltages Above 1 kV.

2. IEC 60909-0-2016. Short-Circuit Currents in Three-Phase AC Systems. Part 0: Calculation of Currents.

3. ANSI/IEEE Std. C37.010. IEEE Application Guide for AC High-Voltage Circuit Breakers Rated on a Symmetrical Current Basis. – 2016.

4. ANSI/IEEE Std. C37.13-1981. IEEE Standard for Low-Voltage AC Power Circuit Breakers Used in Enclosures.

5. Abdurakhmanov, A. M. Analysis of foreign normative and technical documentation and practical recommendations for the calculation and coordination of short-circuit currents in electrical networks / A. M. Abdurakhmanov // *Electrical Engineering: network electronic scientific journal*. – 2016. – Vol. 3, No. 2. – Pp. 3-23.

6. Kovalev, B. I. The main reasons for insufficient accuracy and the tasks of improving the quality of short-circuit current calculations in electrical systems / B. I. Kovalev // *Short-circuit currents in power systems: abstracts of reports of the All-Russian conference / under the general editorship of A. F. Dyakov*. – M.: RAO "UES of Russia", 1995. – Pp. 8-11.

7. Suvorov, A. A. The Problem of Reliability of Short-Circuit Current Calculations in Electric Power Systems and Means of Their All-Mode Verification / A. A. Suvorov, A. S. Gusev, M. V. Andreev, S. A. Stavitsky // *Bulletin of the Russian Academy of Sciences. Power Engineering*. – 2018. – No. 2. – P. 13-25.

8. Suvorov, A. A. All-Mode Verification of Calculations in the Analysis of Dynamic Stability of Electric Power Systems / A. A. Suvorov, A. S. Gusev, M. V. Andreev, A. B. Askarov // *Electricity*. – 2020. – No. 11. – P. 28-37. – DOI: 10.24160/0013-5380-2020-11-28-37.

9. Glebov, I. A. Methodology for Processing Experimental Data on a Sudden Three-Phase Short Circuit of a Hydrogenerator / I. A. Glebov, E. F. Kharlamova // *Bulletin of the Russian Academy of Sciences. Power Engineering*. – 1999. – No. 3. – P. 153–157.

10. Savina, N. V. Taking into Account Nonlinear Loads in Short Circuit Calculations / N. V. Savina, Yu. V. Myasoedov, L. A. Myasoedova, I. G. Podgurskaya // *Bulletin of Amur State University. Series: Natural Science and Economic Sciences*. – 2014. – Issue 65. – P. 63–72.

11. Gorev, A. A. Transient processes of a synchronous machine / A. A. Gorev; eds. M. L. Levinshtein, L. A. Sukhanov. – 2nd ed., suppl. – L.: Science: Leningrad Branch, 1985. – 502 p.

12. Gamazin, S. I. Transient processes in industrial power supply systems caused by electric motor load / S. I. Gamazin, V. A. Stavtsev, S. A. Tsyruk. – Moscow: MPEI Publishing House, 1997. – 424 p.

13. Zhezhelenko, I. V. Higher harmonics in power supply systems of industrial enterprises: textbook for universities in the specialty "Power Supply" / I. V. Zhezhelenko. – 4th ed., revised. and add. – M.: Energoatomizdat, 2000. – 331 p.: ill. – ISBN 5-283-0319-8.

14. Guidelines for Calculating Short-Circuit Currents and Selecting Electrical Equipment / edited by B. N. Neklepaev. – M.: NC ENAS, 2002. – 152 p.

15. Sivokobylenko, V. F. Transient Processes in Multi-Machine Power Supply Systems of Power Plants: Textbook / V. F. Sivokobylenko. – Donetsk: Donetsk Polytechnic Institute, 1984. – 116 p.

16. Dubovik, D. V. Theoretical Aspects and Problems of Calculating Short-Circuit Currents in the Power Supply System of an Active Semi-Trailer Traction Electric Drive / D. V. Dubovik, T. V. Golubchik, A. S. Dyakov, R. A. Zakirov // *Bulletin of the South Ural State University. Series: Mechanical Engineering*. – 2023. – Vol. 23, No. 4. – Pp. 5–20. – DOI: 10.14529/engin230401.

17. Nikolaev, A. A. Algorithm for Calculating Initial Values of Short-Circuit Currents and Residual Voltages for Parallel and Separate Operation for a Metallurgical Plant's Own Power Plant.

18. Grigoriev, A. V. Theoretical issues of calculating short-circuit currents in ship electric power systems with DC power distribution / A. V. Grigoriev, A. Yu. Vasiliev, Yu. A. Kulagin // *Bulletin of the Admiral S. O. Makarov State University of Maritime and Inland Shipping*. – 2017. – Vol. 9, No. 5. – P. 1095-1103.

19. Papadopoulos, T. A. Static and Dynamic Calculation of Short-Circuit Currents in Synchronous Generators / T. A. Papadopoulos, Ch. G. Kalaoudas, P. N. Papadopoulos, A. G. Marinopoulos, G. K. Papadiannis // *International Conference on Power Systems Transients (IPST2011)*, Delft, the Netherlands, 14–17 June 2011.

20. Kaloudas, C. G. Short-Circuit Analysis of an Isolated Generator and Comparative Study of IEC, ANSI and Dynamic Simulation / C. G. Kaloudas, P. N. Papadopoulos, T. A. Papadopoulos, A. G. Marinopoulos, G. K. Papagiannis // 7th Mediterranean Conference and Exhibition on Power Generation, Transmission, Distribution and Energy Conversion (MedPower 2010), Agia Napa, 2010. – Pp. 1–7. – DOI: 10.1049/cp.2010.0922.
21. Berizzi, A. Short-Circuit Current Calculation: a Comparison Between Methods of IEC and ANSI Standards Using Dynamic Simulation as Reference / A. Berizzi, A. Silvestri, D. Zaninelli, S. Massucco // Conference Record of the 1993 IEEE Industry Applications Conference. Twenty-Eighth IAS Annual Meeting, Toronto, ON, Canada, 1993. – Pp. 1420–1427, vol. 2. – DOI: 10.1109/IAS.1993.299168.
22. Stojanovic, D. Generator Dynamics Influence on Currents Distribution in Fault Condition / D. Stojanovic, J. Nahman, M. Veselinovic // 10th Mediterranean Electrotechnical Conference. Information Technology and Electrotechnology for the Mediterranean Countries (MeleCon 2000), Lemesos, Cyprus, 2000. – Pp. 1047–1050, vol. 3. – DOI: 10.1109/MELCON.2000.879714.
23. Stojanovic, D. Influence of Relative Rotor Swing to Short-Circuit Currents / D. Stojanovic, N. Mitrovic, M. Veselinovic // Conference Juko-Cigre, R23-05, Vrnjacka Banja, May 1995. (in Serbian).
24. Stojanovic, D. Influence of Relative Swing to Short-Circuit Currents / D. Stojanovic, M. Veselinovic // UPEC'96, Iraklio, Crete, Greece, 1996. – Vol. 3. – Pp. 1016–1019.
25. Stojanovic, D. P. Calculation and Analysis of Generator Dynamics Influence on Short Circuit Current / D. P. Stojanovic, J. M. Nahman, M. O. Veselinovic // MELECON'98. 9th Mediterranean Electrotechnical Conference, Tel-Aviv, Israel, 1998. – Pp. 1131–1134, vol. 2. – DOI: 10.1109/MELCON.1998.699409.
26. Gusev, Yu. P. Taking into account the out-of-phase nature of generators when calculating currents at the initial moment of a short circuit / Yu. P. Gusev, A. G. Kayumov, V. V. Govorin // Bulletin of the Moscow Power Engineering Institute. Bulletin of MPEI. – 2019. – No. 4. – pp. 11–17. – DOI: 10.24160/1993-6982-2019-4-11-17.
27. Kayumov, A. G. Influence of Out-of-Phase of Synchronous Generators on Short-Circuit Currents in Power Systems / A. G. Kayumov, Y. P. Gusev, V. V. Govorin // 2018 International Ural Conference on Green Energy (UralCon), Chelyabinsk, Russia, 2018. – Pp. 107–113. – DOI: 10.1109/URALCON.2018.8544340.
28. Gusev, Yu. P. The Impact of Dynamic Out-of-Phase Synchronous Generators on Short-Circuit Currents in Electric Power Systems / Yu. P. Gusev, A. G. Kayumov // Electricity. – 2021. – No. 3. – Pp. 26–32. – DOI: 10.24160/0013-5380-2021-3-26-32.
29. Gusev, Yu. P. The Impact of Excitation Systems of Synchronous Generators on the Out-of-Phase Short-Circuit Currents in an Electric Power System / Yu. P. Gusev, A. G. Kayumov, V. V. Govorin // Relay Protection and Automation. – 2019. – No. 3. – Pp. 30–33.
30. Dmitriev, M. V. Short-circuit Currents in Electrical Networks Containing Modern 6–500 kV Cable Lines / M. V. Dmitriev // Electric Power. Transmission and Distribution. – 2023. – No. 3 (78). – Pp. 82–86.
31. Kosimov, B. I. Application of Asynchronized Synchronous Generators as Alternative Electric Power Sources for Small and Medium-Sized Rivers / B. I. Kosimov, N. S. Sharbatov, D. S. Aminov [et al.] // Polytechnic Bulletin. Series: Engineering Research. – 2026. – No. 1 (73). – Pp. 28–34. – DOI: 10.65599/ENG3328. – EDN KXWHTF.
32. Faria, V. The Influence of Field Voltage Variation in the Sudden Three-Phase Short-Circuit Test. Parameter Estimation of Synchronous Machines Considering Field Voltage Variation During the Sudden Short-Circuit Test. – November 2018.
33. Faria, V. A. D. Parameter Estimation of Synchronous Machines Considering Field Voltage Variation During the Sudden Short-Circuit Test / V. A. D. Faria, J. V. Bernardes, E. C. Bortoni // International Journal of Electrical Power & Energy Systems. – 2020. – Vol. 114. – Art. 105421. – ISSN 0142-0615. – DOI: 10.1016/j.ijepes.2019.105421.
34. Wang, H. Simulation of Three-Phase Short Circuit Electromagnetic Transient Process of Synchronous Generator / H. Wang // Vibroengineering PROCEDIA. – 2020. – Vol. 35. – Pp. 33–38. – DOI: 10.21595/vp.2020.21800.
35. Yin, J. A New Short-Circuit Current Calculation and Fault Analysis Method Suitable for Doubly Fed Wind Farm Groups / J. Yin, W. Qian, X. Huang // Sensors. – 2023. – Vol. 23. – Art. 8372. – DOI: 10.3390/s23208372.
36. Zhang, L. Analytical Calculation of Stator Short Circuit Current of DFIG Considering PLL Dynamics Under Asymmetric Fault / L. Zhang, S. Li, S. Xu, X. Zhou, S. Li, Q. Xu, J. Shen, W. Zhao, J. Song, T. Wang // Energy Reports. – 2025. – Vol. 14. – Pp. 3547–3562. – ISSN 2352-4847. – DOI: 10.1016/j.egyr.2025.10.027.
37. Zhou, N. Short-Circuit Calculation in Distribution Networks with Distributed Induction Generators / N. Zhou, F. Ye, Q. Wang, X. Lou, Y. Zhang // Energies. – 2016. – Vol. 9. – Art. 277. – DOI: 10.3390/en9040277.
38. Li, J. Short-Circuit Current Calculation and Harmonic Characteristic Analysis for a Doubly-Fed Induction Generator Wind Turbine Under Converter Control / J. Li, T. Zheng, Z. Wang // Energies. – 2018. – Vol. 11. – Art. 2471. – DOI: 10.3390/en11092471.
39. Yin, J. Improved Short-Circuit Current Calculation of Doubly Fed Wind Turbines With Uninterrupted Excitation / J. Yin // Frontiers in Energy Research. – 2021. – Vol. 9. – Art. 686138. – DOI: 10.3389/fenrg.2021.686138.

40. Sorrentino, E. Comparison Between Peak Values of Induction Motor Currents' Waveforms During Nearby Three-Phase Short-Circuits and Results From Standardized Calculations / E. Sorrentino, A. Vera // IET Generation, Transmission & Distribution. – 2023. – Vol. 17, No. 7. – Pp. 1400–1408. – DOI: 10.1049/gtd2.12746.

41. Yin, J. Influence of Reactive Power Support Control Strategy on Short-Circuit Current Calculation and Fault Analysis Method of DFIG / J. Yin // Energy Reports. – 2021. – Vol. 7. – Pp. 5933–5942. – ISSN 2352-4847. – DOI: 10.1016/j.egyr.2021.09.008.

42. Klontz, K. W. Short-Circuit Analysis of Permanent-Magnet Generators / K. W. Klontz, T. J. E. Miller, M. I. McGilp, H. Karmaker, P. Zhong // IEEE Transactions on Industry Applications. – 2011. – Vol. 47, No. 4. – Pp. 1670–1680. – DOI: 10.1109/TIA.2011.2154370.

43. Gulov, D. Yu. Detection of Interturn Short Faults in the Winding of a Synchronous Generator / D. Yu. Gulov, A. M. Davlatov, N. Kh. Odinaev [et al.] // Polytechnic Bulletin. Series: Engineering Research. – 2026. – No. 1 (73). – P. 35–42. – DOI: 10.65599/ENG6423. – EDN BFLWFR.

МАЪЛУМОТ ДАР БОРАИ МУАЛЛИФОН – СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ – INFORMATION ABOUT AUTHORS

TJ	RU	EN
Қаюмов Алишер Гафурҷонович	Каюмов Алишер Гафурджонович	Kayumov Alisher Gafurdzhonovich
н.и.т., саромӯзгор	к.т.н., старший преподаватель	Candidate of Technical Sciences, Senior teacher
Донишқадаи энергетикии Тоҷикистон	Институт энергетикии Таджикистана	Institute of Energy of Tajikistan
E-mail: kayumov_ag@mail.ru		
https://orcid.org/0009-0005-0068-7361		
TJ	RU	EN
Амонуллоев Азизхон Резмонович	Амонуллоев Азизхон Резмонович	Amonullov Azizkhon Rezmonovich
саромӯзгор	старший преподаватель	Senior Lecturer
Донишқадаи энергетикии Тоҷикистон	Институт энергетикии Таджикистана	Institute of Energy of Tajikistan
E-mail: azizkhon.ar@mail.ru		
https://orcid.org/0009-0005-6577-2524		
TJ	RU	EN
Ҷаборова Манучеҳр Камолович	Джаборова Манучеҳр Камолович	Jaborov Manuchehr Kamolovich
саромӯзгор	старший преподаватель	Senior teacher
Донишқадаи энергетикии Тоҷикистон	Институт энергетикии Таджикистана	Institute of Energy of Tajikistan
E-mail: manuchehrjkm@mail.ru		
https://orcid.org/0009-0001-8539-2044		
TJ	RU	EN
Аминов Дилшод Саидович	Аминов Дилшод Саидович	Aminov Dilshod Saidovich
н.и.т., саромӯзгор	к.т.н., старший преподаватель	Candidate of Technical Sciences Senior teacher
Донишқадаи энергетикии Тоҷикистон	Институт энергетикии Таджикистана	Institute of Energy of Tajikistan
E-mail: aminov_ds@mail.ru		
https://orcid.org/0000-0001-8712-8063		
TJ	RU	EN
Қосимов Бахтиёр Исматуллоевич	Косимов Бахтиёр Исматуллоевич	Kosimov Bakhtiyor Ismatulloevich
н.и.т., саромӯзгор	к.т.н., старший преподаватель	Candidate of Technical Sciences Senior teacher
Донишқадаи энергетикии Тоҷикистон	Таджикский энергетический институт	Institute of Energy of Tajikistan
E-mail: kosimov.energy@mail.ru		
https://orcid.org/0000-0001-8807-3260		

ВЛИЯНИЕ ИЗМЕНЕНИЯ МОЩНОСТИ НАГРУЗКИ НА РАСПРЕДЕЛЕНИЕ АКТИВНОЙ МОЩНОСТИ МЕЖДУ ВЕТРОЭЛЕКТРИЧЕСКИМ И ДИЗЕЛЬ-ГЕНЕРАТОРОМ

Р.А. Джалилов

Таджикский технический университет имени академика М.С. Осими, г. Душанбе, Республика Таджикистан

В статье рассмотрены вопросы распределения активной мощности между параллельно работающими ветроэлектрическим генератором с регулированием угла разворота лопастей и дизель-генератором при изменении мощности нагрузки. Показано, что при одинаковых мощностях ветроэлектрического и дизель-генераторов при скоростях ветра выше расчетной возможно лишь небольшое снижение мощности нагрузки. Если потребители энергии не предъявляют жестких требований к частоте напряжения, изменением уставки частоты вращения дизеля можно добиться большего предельно допустимого снижения мощности нагрузки. Выявлено, что условия параллельной работы ветроагрегатов и дизель-генераторов можно улучшить (без учета оптимальности по экономическому показателю) при росте установленной мощности дизель-генераторов. Увеличение доли установленной мощности дизель-генераторов не только расширяет границы предельных скоростей ветра, но и допускает значительные колебания нагрузки.

Ключевые слова: ветроагрегат, статические характеристики, нагрузка, параллельная работа, мощность, нагрузка, распределение.

ТАЪСИРИ ТАҒИРЁБИИ ИҚТИДОРИ БОР БА ТАҚСИМОТИ ИҚТИДОРИ АКТИВ БАЙНИ ГЕНЕРАТОРИ БОДӢ ВА ДИЗЕЛ-ГЕНЕРАТОР

Р.А. Ҷалилов

Донишгоҳи техникии Тоҷикистон ба номи академик М.С. Осимӣ, ш. Душанбе, Ҷумҳурии Тоҷикистон

Дар мақола масъалаҳои тақсими иқтидри актив байни генератори бодӣ бо танзими кунҷи гардиши парраҷарҳҳо ва дизел-генератор, ки ба таври параллелӣ фаъолият мекунад, ҳангоми тағйир ёфтани иқтидори бор баррасӣ шудаанд. Нишон дода шудааст, ки ҳангоми баробар будани иқтидорҳои генератори бодӣ ва дизел-генератор, ҳангоми аз арзиши ҳисобшуда зиёд будани суръати шамол, танҳо каме коҳиш додани иқтидори бор имконпазир аст. Агар истеъмолкунандагони энергия ба басомади шиддати барқ талаботи сахт надошта бошанд, бо тағйир додани қиёсаки басомади гардиши дизел метавон бачоиизи ҳадди коҳиши бештари бор ноил шуд. Муайян карда шудааст, ки шароити кори параллелии агрегатҳои бодӣ ва дизел-генераторҳо (бе дарназардошти нишондиҳандаи иқтисодӣ) ҳангоми зиёд шудани иқтидори насбшудаи дизел-генераторҳо бехтар кардан мумкин аст. Зиёд шудани ҳиссаи иқтидори насбшудаи дизел-генераторҳо на танҳо ҳудуди суръатҳои ҳадди шамолро васеъ мекунад, балки инчунин ба лпишҳои назарраси бор имконият медиҳад.

Калидвожаҳо: агрегати бодӣ, тавсифоти статикӣ, бор, кори параллелӣ, иқтидор, бор, тақсимот.

THE EFFECT OF LOAD POWER VARIATION ON THE DISTRIBUTION OF ACTIVE POWER BETWEEN A WIND GENERATOR AND A DIESEL GENERATOR

R.A. Jalilov

Tajik Technical University named after Academician M.S. Osimi, Dushanbe, Tajikistan

The article examines the issues of active power distribution between a wind power generator with blade pitch angle control and a diesel generator operating in parallel under changing load power conditions. It is shown that when the capacities of the wind generator and the diesel generator are equal, and when wind speeds exceed the rated value, only a small reduction in load power is possible. If energy consumers do not impose strict requirements on the voltage frequency, a greater permissible reduction in load power can be achieved by adjusting the setpoint of the diesel engine rotational speed. It has been found that the conditions for parallel operation of wind turbines and diesel generators can be improved (without considering optimality from an economic standpoint) by increasing the installed capacity of diesel generators. Increasing the share of installed diesel generator capacity not only expands the limits of allowable wind speeds but also allows for significant load fluctuations.

Keywords: wind turbine, static characteristics, load, parallel operation, power, load, distribution.

Введение

Моментно-скоростные статические характеристики ветроагрегатов в существенной мере отличаются от характеристик традиционных агрегатов нестабильностью из-за непостоянства скорости ветра [1]. При осуществлении параллельной работы ветроагрегата с дизель-генератором главной трудностью является обеспечение требуемого качества электрической энергии. Решение данной задачи тесно связано с вопросами распределения активной мощности между агрегатами не только при изменениях скорости ветра, но и при изменениях мощности нагрузки.

Материалы и методы исследования

Исследования были проведены применительно к схеме, содержащей эквивалентные ветроэлектрический и дизель-генератор, работающие на нагрузку, мощность которой не зависит от частоты напряжения.

Будем полагать, что при расчетной скорости ветра $u = u_p$ статизм регулирования дизеля равен $S=0,03$, а максимальная мощность $P_{н max}$ нагрузки распределяется между параллельно работающими генераторами в соответствии с соотношением:

$$P_{н max} = P_{вн} + k_d P_{дн}, \quad (1)$$

где $P_{вн}$, $P_{дн}$ – номинальная мощность ветроагрегата и дизель-генератора, соответственно, k_d – коэффициент загрузки дизель генератора, характеризующий величину его маневренной мощности.

Мощность ветровой турбины рассчитывалась по известному аналитическому выражению [2, 3]:

$$P_B = \frac{\pi \rho u^3 R^2}{2} \xi(z, \phi) \quad (2)$$

где R – радиус ветроколеса, ρ – массовая плотность воздуха, u – скорость ветра, $z = \frac{\omega R}{u}$ – число модулей быстроходности колеса, ϕ – угол разворота лопастей, ξ – коэффициент использования энергии ветра, представляющий собой отношение полезной механической мощности вращающегося колеса к полной мощности воздушного потока, ометаемого ветроколесом.

Поскольку мощность ветроагрегата с регулированием угла разворота лопастей при скоростях ветра $u < u_p$ ниже номинальной мощности $P_{вн}$, чем ниже величина коэффициента загрузки дизеля k_d в выражении (1), тем большее можно допустить снижение скорости ветра от расчетного значения при неизменной величине мощности нагрузки. Другим фактором, влияющим на выбор величины k_d , является ухудшение режима работы дизеля при нагрузке ниже 40% от номинальной мощности [4,5]. Поэтому принимаем $k_d=0,5$.

Результаты исследования

Вначале оценим распределение активной мощности между параллельно работающими ветроэлектрическим и дизель-генератором, имеющими одинаковую мощность, при изменениях мощности нагрузки. Из анализа рис.1 видно, что при скоростях ветра $u \geq u_p$, когда ветроагрегат имеет номинальную нагрузку, а дизель-генератор, близкую к номинально допустимой, возможно лишь незначительное снижение мощности нагрузки. Так, при выбранном ранее $k_d=0,5$, предельно допустимое снижение ΔP_n мощности нагрузки при неизменной уставке регулятора частоты вращения дизеля составляет всего 9% (точки F-F' на рис.1). Изменение уставки регулятора (с учетом $|\Delta \omega_{max}| \leq 1\%$) позволяет довести это снижение до 14,3%. Активные мощности ветроэлектрического и дизель-генераторов при разных u в этом случае соответствуют точкам В-В', С-С', Е-Е', Д-Д' на рис 1.

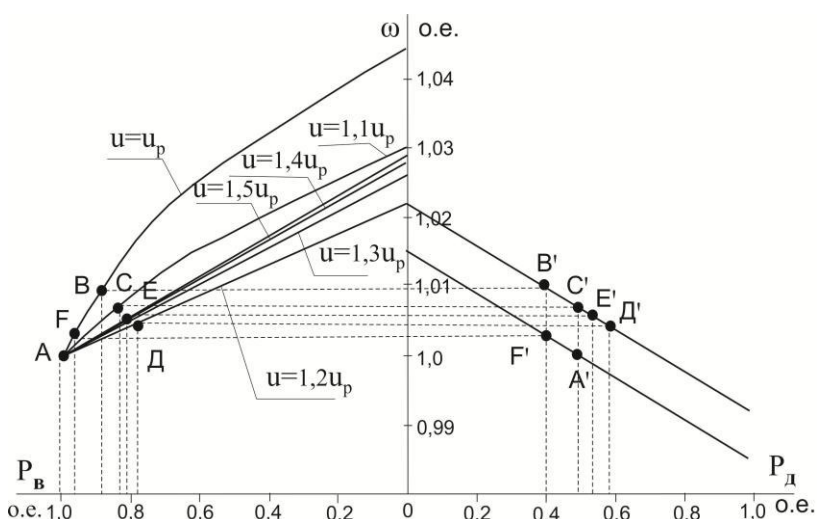


Рисунок 1 – Распределение активной мощности между ветроагрегатом с регулированием угла разворота лопастей и дизелем при $P_0:P_n=1:1$ и $u \geq u_p$

Figure 1 – Active power distribution between a pitch-controlled wind turbine and a diesel generator at $P_0:P_n=1:1$ and $u \geq u_p$

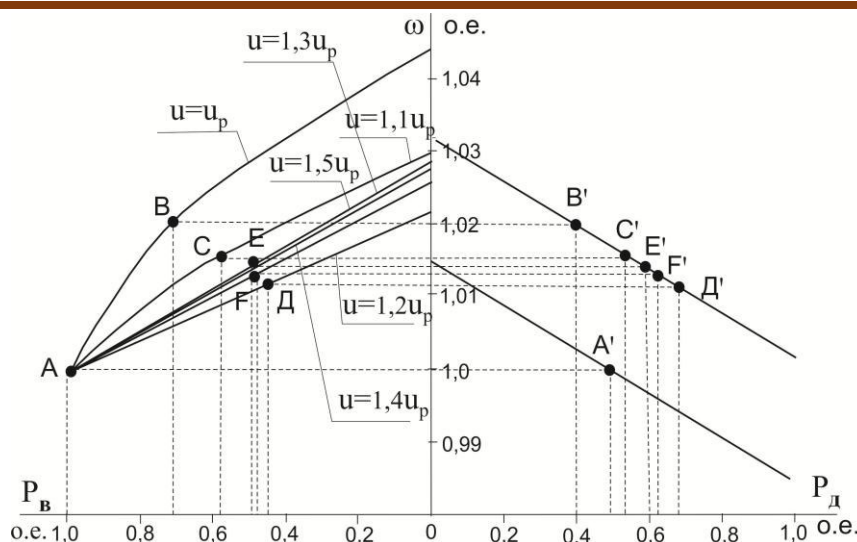


Рисунок 2 – Распределение активной мощности между ветроагрегатом с регулированием угла разворота лопастей и дизелем при $P_D:P_B=1:1$ и $u \geq u_p$, $\Delta\omega_{\max}=\pm 2\%$

Figure 2 – Active power distribution between a pitch-controlled wind turbine and a diesel generator at $P_D:P_B=1:1$ and $u \geq u_p$, $\Delta\omega_{\max}=\pm 2\%$

В тех случаях, когда потребители энергии не предъявляют жестких требований к частоте ω напряжения, изменением уставки частоты вращения дизеля можно добиться большего значения ΔP_H . Из анализа рис.2 видно, что при отклонении частоты $\Delta\omega_{\max}=\pm 2\%$ допустимое снижение мощности нагрузки составило 25%. Активные мощности ветроэлектрического и дизель-генераторов в этом случае соответствуют точкам В-В', С-С', Е-Е', Д-Д', F-F' на рис. 2. Дальнейшее изменение уставки регулятора частоты вращения дизеля в сторону увеличения ω нецелесообразно ввиду снижения выработки ветроагрегата.

Как было отмечено в [2], условия параллельной работы агрегатов при изменениях мощности нагрузки можно улучшить путем подключения балластной нагрузки или устройств аккумулирования энергии в периоды снижения базовой части нагрузки и разработкой дизелей, способных работать при любой самой малой нагрузке. В табл. 1 приводятся предельно допустимые величины уменьшения мощности нагрузки $\Delta P_{\min}$ для различных минимально допустимых уровней загрузки дизель-генератора. Величины ΔP_H рассчитаны по статическим характеристикам рис. 1,2 с учетом изменения уставки регулятора частоты вращения дизеля и условий $|\Delta\omega_{\max}| \leq 1\%$, $|\Delta\omega_{\max}| \leq 2\%$.

Таблица 1 – Предельно допустимые значения уменьшения мощности нагрузки $\Delta P_{\min}$ при различных минимально допустимых уровнях загрузки дизель-генератора

Table 1 – Maximum allowable load reduction values $\Delta P_{\min}$ at various minimum allowable loading levels of the diesel generator

$P_{\min}$, о.е.		0,4	0,3	0,2	0,1	0
ΔP_H , %	$ \Delta\omega_{\max} \leq 1\%$	-14,3	-21	-27,6	-34,3	-41
	$ \Delta\omega_{\max} \leq 2\%$	-25	-31,7	-38,3	-45	-52

Из рассмотренных данных таблицы 1 следует, что снижение технологического минимума загрузки дизеля позволяет значительно расширить диапазон допустимых изменений скорости ветра.

Условия параллельной работы ветроагрегатов и дизель-генераторов можно улучшить (без учета оптимальности по экономическому показателю) при росте установленной мощности дизель-генераторов. На рис.3,4 показано распределение активной мощности между ветроагрегатом с регулированием угла разворота лопастей и дизелем при соотношении установленных мощностей $P_D:P_B=2:1$ и $k_D=0,5$.

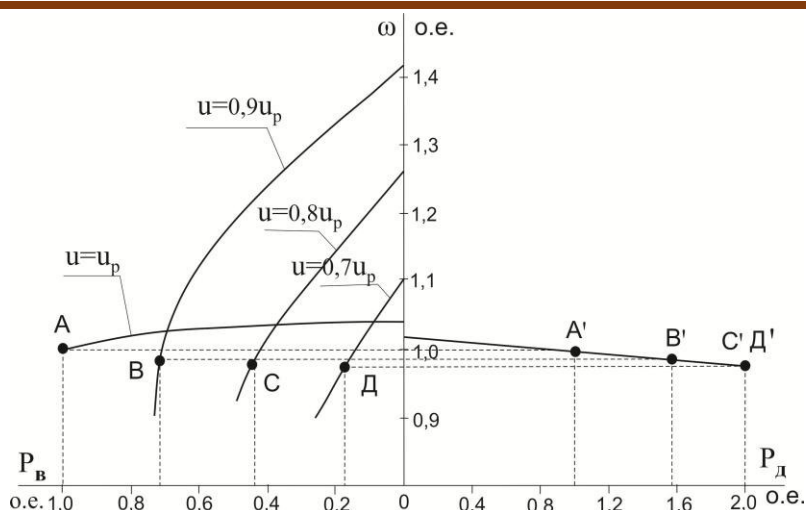


Рисунок 3 – Распределение активной мощности между ветроагрегатом с регулированием угла разворота лопастей и дизелем при $P_0:P_8=2:1$ и $u < u_p$

Figure 3 – Active power distribution between a pitch-controlled wind turbine and a diesel generator at $P_0:P_8=2:1$ & $u < u_p$

Как видно из рис. 3,4 увеличение маневренной мощности двигателя позволяет покрывать максимум нагрузки $P_{нmax}$ даже при отсутствии ветра. В табл.2 приведены предельно допустимые величины уменьшения мощности нагрузки ΔP_{dmin} для различных допустимых $|\Delta \omega_{max}| \leq 1\%$, рассчитанные по статическим характеристикам рис.4 с учетом изменения уставки регулятора частоты вращения дизеля и условия $|\Delta \omega_{max}| \leq 1\%$.

Таблица 2 – Предельно допустимые значения уменьшения мощности нагрузки ΔP_{dmin} при условии $|\Delta \omega_{max}| \leq 1\%$

Table 2 – Maximum allowable load reduction values ΔP_{dmin} under the condition of $|\Delta \omega_{max}| \leq 1\%$

P_{dmin} , о.е.	0,4	0,3	0,2	0,1	0
ΔP_n , %	-15,8	-25,8	-35,8	-45,8	-55,8

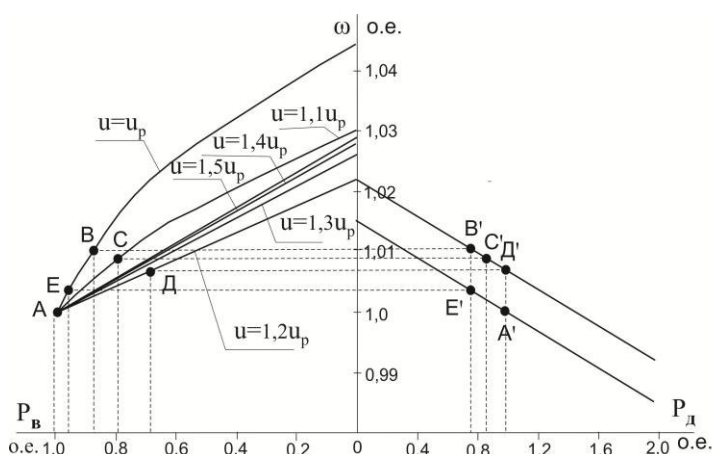


Рисунок 4 – Распределение активной мощности между ветроагрегатом с регулированием угла разворота лопастей и дизелем при $P_0:P_8=2:1$ и $u \geq u_p$.

Figure 4 – Active power distribution between a pitch-controlled wind turbine and a diesel generator at $P_0:P_8=2:1$ & $u \geq u_p$.

Активные мощности ветроэлектрического и дизель-генераторов при различных u и $P_{dmin}=0,4$ соответствуют точкам В-В', С-С', Д-Д' на рис.4.

Сравнительный анализ табл. 1 и 2 показывает, что увеличение доли установленной мощности дизель-генераторов при неизменном κ_d не только расширяет границы предельных скоростей ветра, но и допускает значительные колебания нагрузки.

Выводы

1. При одинаковых мощностях ветроэлектрического и дизель-генераторов при скоростях ветра выше расчетной возможно лишь небольшое снижение мощности нагрузки.
2. Если потребители энергии не предъявляют жестких требований к частоте напряжения, изменением уставки частоты вращения дизеля можно добиться большего предельно допустимого снижения мощности нагрузки.
3. Увеличение доли установленной мощности дизель-генераторов при неизменном k_d не только расширяет границы предельных скоростей ветра, но и допускает значительные колебания нагрузки.
4. Выбор соотношения установленных мощностей дизелей и ветроагрегатов, их числа, коэффициента загрузки k_d дизелей при расчетной скорости ветра должен решаться в каждом конкретном случае с учетом требований экономичности, состава и вида нагрузки.

Рецензент: Ш.Дж. Джуразода, к.т.н., доцент филиала МЭИ в г. Душанбе

Литература

1. Джалилов, Р.А. Особенности параллельной работы ветроагрегатов с регулированием угла разворота лопастей и дизель-генераторов / Р.А. Джалилов, А.А. Рагозин // Энергетика... (Известия высших учебных заведений). – 1992. – № 1. – С. 41–46.
2. Abo-Khalil, A.G. Dynamic modeling of wind turbines based on estimated wind speed under turbulent conditions / A.G. Abo-Khalil, S. Alyami, K. Sayed, A. Alhejji // Energies. – 2019. – Vol. 12. – Art. 1907. – DOI: 10.3390/en12101907.
3. Самохвалов, Д.В. Математическая модель ветротурбины малой мощности с горизонтальной осью / Д.В. Самохвалов, А.И. Джабер // Известия СПбГЭТУ «ЛЭТИ». – 2019. – № 9. – С. 65–69.
4. Samohvalov, D.V. An experimental investigation on the performance of a single cylinder diesel engine at various partial loads / D.V. Samohvalov, A.I. Djaber // Thermal Engineering. – 2024. – DOI: 10.1016/j.treng.2024.100288.
5. Zhang, J. Research on combustion and emissions of heavy duty diesel engines under low-speed and low-load conditions in low temperature environments / J. Zhang, G. Liu, H. Xu // PLOS ONE. – 2025. – Vol. 20. – No. 2. – DOI: 10.1371/journal.pone.0318933.

Reference

1. Dzhaliylov, R. A. Features of Parallel Operation of Wind Turbines with Adjustable Blade Pitch and Diesel Generators / R. A. Dzhaliylov, A. A. Ragozin // Power Engineering (News of Higher Educational Institutions). – 1992. – No.1. – Pp.41–46.
2. Abo-Khalil, A. G. Dynamic Modeling of Wind Turbines Based on Estimated Wind Speed Under Turbulent Conditions / A. G. Abo-Khalil, S. Alyami, K. Sayed, A. Alhejji // Energies. – 2019. – Vol.12. – Art. 1907. – DOI: 10.3390/en12101907.
3. Samokhvalov, D. V. Mathematical Model of a Low-Power Horizontal-Axis Wind Turbine / D. V. Samokhvalov, A. I. Jaber // Bulletin of ETU “LETI”. – 2019. – No.9. – Pp.65–69.
4. Samohvalov, D. V. An Experimental Investigation on the Performance of a Single-Cylinder Diesel Engine at Various Partial Loads / D. V. Samohvalov, A. I. Djaber // Thermal Engineering. – 2024. – DOI: 10.1016/j.treng.2024.100288.
5. Zhang, J. Research on Combustion and Emissions of Heavy-Duty Diesel Engines Under Low Speed and Low Load Conditions in Low-Temperature Environments / J. Zhang, G. Liu, H. Xu // PLOS ONE. – 2025. – Vol.20, No.2. – DOI: 10.1371/journal.pone.0318933.

МАЪЛУМОТ ДАР БОРАИ МУАЛЛИФ-СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРЕ-INFORMATION ABOUT AUTHOR

TJ	RU	EN
Чалилов Рустам Абдухамидович	Джалилов Рустам Абдухамидович	Jalilov Rustam Abduhamidovich
н.и.т., дотсент	к.т.н., доцент	Ph.D., associate professor
ДТТ ба номи академик М.С.Осими	ТТУ имени академика М.С. Осими	TTU named after academician M.S. Osimi
E.mail: drustam@mail.ru		

ОПТИМИЗАЦИЯ РЕЖИМОВ РАБОТЫ ГИБРИДНОЙ ЭНЕРГЕТИЧЕСКОЙ СИСТЕМЫ МУРГАБСКОГО РАЙОНА РЕСПУБЛИКИ ТАДЖИКИСТАН

Р.Х. Диёрзода, Б.Н. Шарифов, Ф.Н. Кувватов

Таджикский технический университет имени академика М.С. Осими, г. Душанбе, Республика Таджикистан

В статье представлены результаты комплексного исследования и оптимизации режимов электропотребления в изолированной гибридной энергосистеме Мургабского района Горно-Бадахшанской автономной области (ГБАО) Республики Таджикистан. Актуальность работы обусловлена экстремальными природно-климатическими условиями региона (высота 3600–3800 м над уровнем моря, температура зимой до -50°C), ограниченностью установленной мощности базовых генерирующих источников и выраженной сезонной неравномерностью электропотребления. На основе фактических эксплуатационных данных компании «Помир Энерджи» за период 2021–2024 гг. выполнен анализ режимных характеристик энергосистемы, включающей малые гидроэлектростанции (МГЭС), солнечные (СЭС) и ветровые (ВЭС) электростанции, дизель-генераторные установки (ДГУ) и аккумуляторные системы накопления энергии (АКБ). Установлено, что в зимний период дефицит генерирующей мощности достигает 30–40% от потребности, что требует оптимизации структуры покрытия нагрузки. Разработана математическая модель оптимизации энергетического баланса на основе системы линейных алгебраических уравнений с целевой функцией минимизации суммарных затрат при соблюдении технологических ограничений. Выполнена количественная оценка эффективности интеграции ВИЭ и систем накопления, показавшая возможность снижения доли дизельной генерации в зимний период на 1–5% и повышения надежности электроснабжения. Научная новизна заключается в адаптации методов оптимизации к специфическим условиям высокогорной изолированной энергосистемы с учетом почасовых ограничений генерации и сезонной неравномерности нагрузки.

Ключевые слова: оптимизация, электропотребление, гибридная энергосистема, возобновляемые источники энергии, малые гидроэлектростанции, солнечные электростанции, ветроэлектростанции, дизель-генераторные установки, математическое моделирование, энергетический баланс.

ОПТИМАЛГАРДОНИИ РЕҶАҲОИ КОРИИ СИСТЕМАИ ГИБРИДИИ ЭНЕРГЕТИКИИ НОҲИЯИ МУРҒОБИ ҶУМҲУРИИ ТОҶИКИСТОН

Р.Ҳ. Диёрзода, Б.Н. Шарифов, Ф.Н. Қувватов

Донишгоҳи техникии Тоҷикистон ба номи академик М.С. Осимӣ, ш. Душанбе, Ҷумҳурии Тоҷикистон

Дар мақола натиҷаҳои таҳқиқоти ҳамаҷониба ва оптималӣ намудани реҷаҳои истеъмоли нерӯи барқ дар системаи энергетикӣи ҷудогонаи гибридии ноҳияи Мурғоби Вилояти Мухтори Кӯҳистони Бадахшон (ВМКБ)-и Ҷумҳурии Тоҷикистон пешниҳод шудаанд. Аҳамияти таҳқиқот ба шароити табинои иқлимии шади миғма (баландӣ 3600–3800 м аз сатҳи баҳр, паст шудани ҳарорати зимистон то -50°C), иқтидори маҳдуди насбшудаи манбаъҳои тавлидкунадаи сарборӣ ва нобаробарии мавсимии истеъмоли нерӯи барқ вобаста аст. Дар асоси маълумоти воқеии фаъолияти ширкати Pomir Energy барои давраи солҳои 2021–2024, таҳлили хусусиятҳои речаи системаи энергетикӣ, аз ҷумла нерӯгоҳҳои барқи обии хурд, нерӯгоҳҳои барқи офтобӣ ва нерӯгоҳҳои барқи бодӣ, маҷмӯи генераторҳои дизелӣ ва системаҳои нигоҳдории энергияи анҷом дода шуд. Муайян карда шуд, ки дар зимистон норасоии иқтидори тавлидкунада ба 30–40% мерасад, ки ин оптималгардонии сохтори фарогирии сарбориро талаб мекунад. Модели математикӣ барои оптималӣ намудани тавозуни энергетикӣ дар асоси системаи муодилаҳои ҳаттии алгебравӣ бо функсияи объективии кам кардани хароҷоти умумӣ ҳангоми риояи маҳдудиятҳои технологӣ таҳия карда шуд. Арзёбии микдории самаранокӣи ҳамгироии манбаъҳои барқароршавандаи энергия ва системаҳои нигоҳдорӣ гузаронида шуд, ки имкони коҳиш додани ҳиссаи истеҳсоли сӯзишвории дизелӣ дар зимистонро то 1–5% ва беҳтар кардани эътимоднокии таъминоти барқро нишон дод. Навовариҳои илмӣ дар мутобик кардани усулҳои беҳсозӣ ба шароити мушаххаси системаи энергетикӣи баландкӯҳ ва ҷудогона ба назардошти маҳдудиятҳои истеҳсоли соатбайъ ва нобаробарии мавсимии бор мебошад.

Калидвожаҳо: оптималгардонӣ, истеъмоли нерӯи барқ, системаи гибридии нерӯи барқ, манбаъҳои энергияи барқароршаванда, нерӯгоҳҳои хурди барқи обӣ, нерӯгоҳҳои барқи офтобӣ, нерӯгоҳҳои барқи бодӣ, маҷмӯи генераторҳои дизелӣ, моделсозии математикӣ, тавозуни энергия.

OPTIMIZATION OF OPERATING MODES OF THE HYBRID ENERGY SYSTEM OF THE MURGHOB DISTRICT OF THE REPUBLIC OF TAJIKISTAN

R. Kh. Diyorzoda, B. N. Sharifov, F. N. Quvvatov

Tajik Technical University named after Academician M.S. Osimi, Dushanbe, Republic of Tajikistan

The article presents the results of a comprehensive study and optimization of power consumption modes in an isolated hybrid power system of the Murghab district of the Gorno-Badakhshan Autonomous Region (GBAO) of the Republic of Tajikistan. The relevance of the study is due to the extreme natural and climatic conditions of the region (altitude 3600–3800 m above sea level, winter temperatures down to -50°C), limited installed capacity of base-load generating sources and pronounced seasonal unevenness of power consumption. Based on actual operating data of Pomir Energy for the period 2021–2024, an analysis of the

mode characteristics of the power system, including small hydroelectric power plants (SHPPs), solar power plants (SPPs) and wind power plants (WPPs), diesel generator sets (DGS) and battery energy storage systems (BES). It was found that in winter, the generating capacity deficit reaches 30-40% of the need, which requires optimization of the load coverage structure. A mathematical model for energy balance optimization was developed based on a system of linear algebraic equations with an objective function of minimizing total costs while observing technological constraints. A quantitative assessment of the efficiency of integrating renewable energy sources and storage systems was conducted, demonstrating the feasibility of reducing the share of diesel generation in winter by 1-5% and improving power supply reliability. The scientific innovation lies in adapting optimization methods to the specific conditions of a high-altitude, isolated power system, taking into account hourly generation constraints and seasonal load unevenness.

Keywords: optimization, power consumption, hybrid power system, renewable energy sources, small hydroelectric power plants, solar power plants, wind power plants, diesel generator sets, mathematical modeling, energy balance.

Введение

Мургабский район расположен в восточной части Горно-Бадахшанской автономной области Республики Таджикистан и является одним из наиболее труднодоступных и высокогорных населенных регионов мира. Административный центр – поселок Мургаб – находится на высоте 3600 – 3800 метров над уровнем моря, что обуславливает экстремальные климатические условия: продолжительная (до 7 месяцев) холодная зима со среднесуточными температурами $-15...-20^{\circ}\text{C}$ и кратковременное прохладное лето.

Энергоснабжение потребителей Мургабского района осуществляется в условиях полной изоляции от централизованной энергосистемы Таджикистана. Ответственность за обеспечение электроэнергией несет компания «Помир Энержи», созданная в 2002 году как государственно-частное партнерство и обеспечивающая на сегодняшний день электроснабжение 98% потребителей ГБАО. До 2020 года основу энергосистемы Мургаба составляла малая гидроэлектростанция «Таджикистан» (бывшая Аксу) с установленной мощностью 1,5 МВт, которая не могла полностью покрыть потребности региона, особенно в зимний период, когда из-за низких температур и ледостава выработка гидроэлектростанции снижается, а потребление возрастает в связи с использованием электроотопления и ярко выраженная сезонная и суточная неравномерность электрической нагрузки. Зимой потребление электроэнергии возрастает из-за необходимости отопления, освещения и работы электронагревательных приборов, в то время как выработка гидроэлектростанций снижается вследствие уменьшения приточности и ледостава. Летом, напротив, наблюдается профицит генерации.

Основой энергосистемы служат малые гидроэлектростанции, включая МГЭС Таджикистан, обеспечивающие базовую генерацию. Ввиду климатических особенностей региона, характеризующихся высоким уровнем солнечной радиации и значительным ветровым потенциалом, в состав системы также входят солнечные электростанции.

В последние годы в регионе реализованы масштабные проекты по развитию ВИЭ. В 2020 году введена в эксплуатацию солнечная электростанция мощностью 220 кВт с гибридной аккумулирующей системой емкостью 180 кВт·ч – самая высокогорная в мире. В 2023 году в СЭС была увеличена до 800 кВт, а емкость аккумуляторных батарей — до 1,2 МВт·ч. Кроме того, в 2025 году завершили строительство трех солнечных электростанций в селах Аличур (2,8 МВт), Гульзор (450 кВт) и Булункуль (565 кВт) с суммарной емкостью накопителей около 2 МВт·ч, на данный момент не подключены к локальной энергосистеме Мургабского района [1].

В качестве резервного и регулирующего источника используются дизель-генераторные установки, а для сглаживания пиков нагрузки и накопления избыточной энергии — аккумуляторные батареи [9].

Себестоимость электроэнергии от различных источников существенно различается: гидрогенерация и СЭС имеют минимальные эксплуатационные затраты, тогда как дизельная генерация требует дорогостоящего привозного топлива, доставка которого в высокогорные условия крайне затруднена.

Перебои в энергоснабжении в условиях суровой зимы создают прямую угрозу жизнеобеспечению населения и функционированию социальных объектов.

Постановка задачи

Целью настоящей работы является разработка и обоснование методов оптимизации режимов электропотребления в гибридной энергосистеме Мургабского района, обеспечивающих

минимизацию затрат потребителей при гарантированном покрытии нагрузки и максимальном использовании потенциала ВИЭ.

Для достижения поставленной цели решались следующие задачи:

1. Анализ многолетней динамики выработки электроэнергии различными источниками генерации на основе эксплуатационных данных за 2021–2024 гг.
2. Выявление закономерностей сезонной и суточной неравномерности энергопотребления.
3. Разработка математической модели оптимизации энергетического баланса с учетом почасовых ограничений.
4. Численная реализация модели и оценка эффективности предлагаемых решений.
5. Обоснование технико-экономической целесообразности применения систем накопления энергии для сглаживания пиковых нагрузок.

Гибридная энергосистема Мургабского района представляет собой сложный технологический комплекс, включающий разнородные источники генерации и накопители энергии. По состоянию на начало 2025 года структура установленных мощностей характеризуется следующими параметрами (таблица 1).

Таблица 1- Состав генерирующих мощностей и систем накопления в Мургабском районе

Table 1 – Generation mix and energy storage systems in the Murghab district

№	Тип источника	Установленная мощность	Год ввода	Примечание
	МГЭС «Таджикистан» (Аксу)	1,5 МВт	реконструкция 2018	Базовая генерация
	СЭС-220 (первая очередь)	220 кВт	2020	С АКБ 180 кВт·ч
	СЭС-600 (вторая очередь)	600 кВт	2023	С АКБ 1,2 МВт·ч
	СЭС Аличур	2,8 МВт	2025 (ввод)	С АКБ 1,4 МВт·ч
	СЭС Булункуль	565 кВт	2025 (ввод)	С АКБ 360 кВт·ч
	СЭС Гульзор	450 кВт	2025 (ввод)	С АКБ 220 кВт·ч
	Октал	190 кВт	2025 (ввод)	С АКБ 130 кВт·ч
	Карасу	95 кВт	2025 (ввод)	С АКБ 30 кВт·ч
	Дизель-генераторные установки	~0,8 МВт (суммарно)	—	Резервный источник
8.	Ветроэнергетические установки	0,15 МВт	—	Экспериментальные образцы

Как следует из представленных данных, в период 2020–2025 гг. произошло многократное увеличение доли солнечной генерации в энергосистеме Мургабского района. Если до 2020 года единственным источником электроэнергии являлась МГЭС, то к 2025 году суммарная мощность СЭС достигнет 4,92 МВт, что более чем в 3 раза превышает мощность гидрогенерации. Это создает принципиально новые возможности для покрытия нагрузки, но одновременно порождает проблему управления разнородными источниками в условиях их стохастической генерации [1-2, 10].

Эффективность функционирования возобновляемых источников энергии в условиях Мургабского района определяется комплексом природно-климатических факторов:

Солнечная радиация. Таджикистан расположен в поясе между 36°40' и 41°05' северной широты, который метеорологи называют «золотым поясом» солнечного сияния. Продолжительность солнечного сияния в стране составляет 2100–3166 часов в год, а количество солнечных дней достигает 260–300. Высокогорное расположение Мургаба обуславливает повышенную интенсивность солнечной радиации вследствие меньшей толщины атмосферного слоя и высокой прозрачности воздуха. Расчетный потенциал солнечной энергетики Таджикистана оценивается в 25 млрд кВт·ч в год.

Температурный режим. Среднегодовая температура в Мургабе отрицательная, зимой температура опускается до $-20...-53^{\circ}\text{C}$. Низкие температуры оказывают двойное влияние на работу СЭС: с одной стороны, снижается температура фотоэлементов, что повышает их КПД, с другой — возможны потери из-за снежного покрова и обледенения.

Ветровой режим. Территория Мургабского района характеризуется значительными ветровыми нагрузками, особенно в осенне-зимний период, что создает предпосылки для эффективного использования ветроэнергетических установок.

Гидрологический режим. Реки Мургабского района относятся к ледниково-снеговому типу питания, что обуславливает минимальный сток в зимние месяцы (декабрь-февраль) и максимальный — в июле-августе. Это приводит к снижению выработки МГЭС в период пикового потребления.

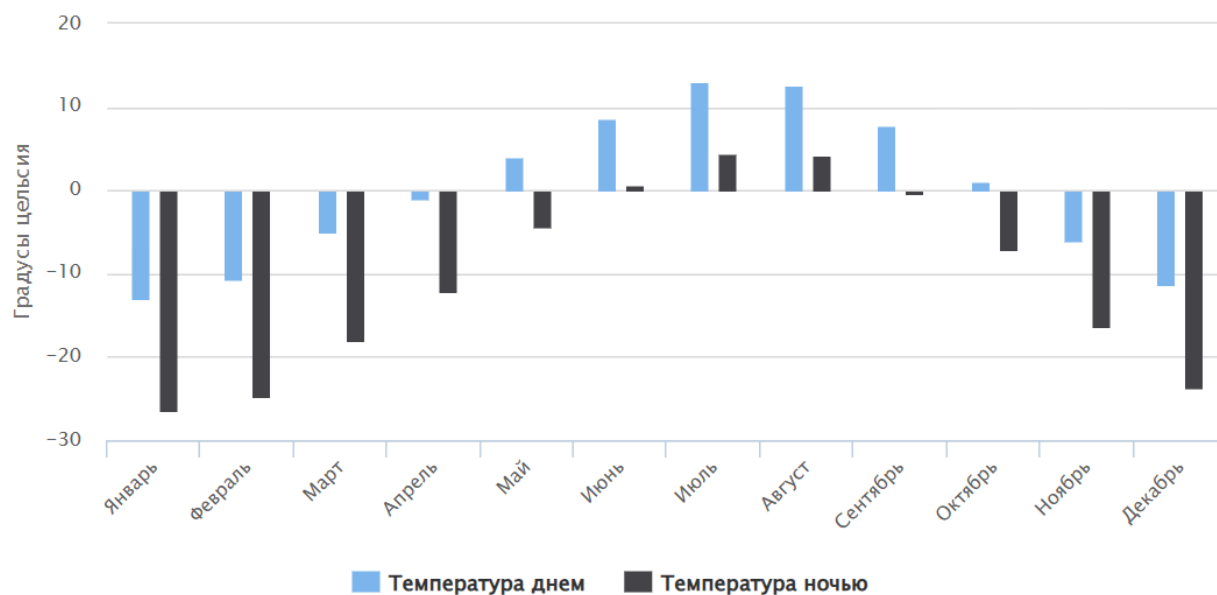


Рисунок 1- Сезонная динамика температур в Мургабском районе

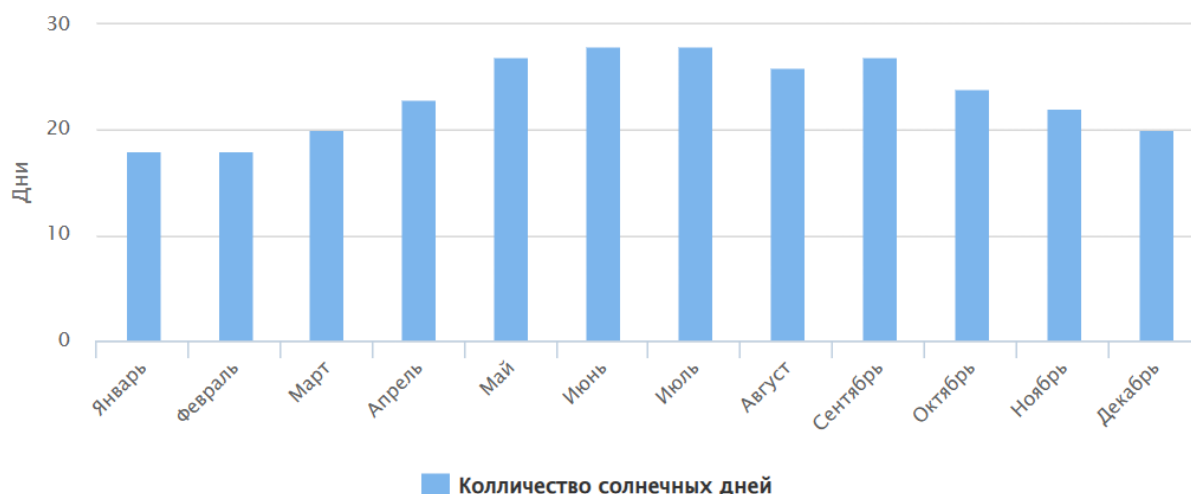


Рисунок 2- Продолжительность светового дня в Мургабском районе
Figure 2 – Daylight duration in the Murghab district

Для количественной оценки сезонной неравномерности и эффективности работы гибридной энергосистемы был выполнен анализ месячной выработки электроэнергии за период 2021–2023 гг.

на основе данных компании «Помир Энерджи» (таблицы 1.1–1.5 исходного текста). Обобщенные результаты представлены в таблице 2 и на рисунке 3.

Таблица 2 – Сопоставление месячной выработки электроэнергии за 2021–2023 гг., тыс. кВт·ч

Table 2 – Comparison of monthly electricity generation for 2021–2023, thousand kWh

№	Месяц	2021 г.	2022 г.	2023 г.	Среднее	Коэффициент сезонности*
	Январь	237,0	252,1	243,5	244,2	0,68
	Февраль	225,9	230,5	234,3	230,2	0,64
	Март	291,2	355,5	357,8	334,8	0,94
	Апрель	396,6	417,5	427,9	414,0	1,16
	Май	445,6	371,4	425,2	414,1	1,16
	Июнь	383,7	312,9	361,2	352,6	0,99
	Июль	347,4	285,1	294,1	308,9	0,86
	Август	332,4	297,8	272,7	301,0	0,84
	Сентябрь	367,3	333,0	347,7	349,3	0,98
	Октябрь	447,7	419,2	449,7	438,9	1,23
	Ноябрь	313,1	337,6	430,8	360,5	1,01
	Декабрь	264,8	242,7	351,4	286,3	0,80
	Год	4052,7	3855,3	4196,4	4034,8	—

Примечание: коэффициент сезонности рассчитан как отношение среднемесячной выработки к среднегодовой ($4034,8 / 12 = 336,2$ тыс. кВт·ч).

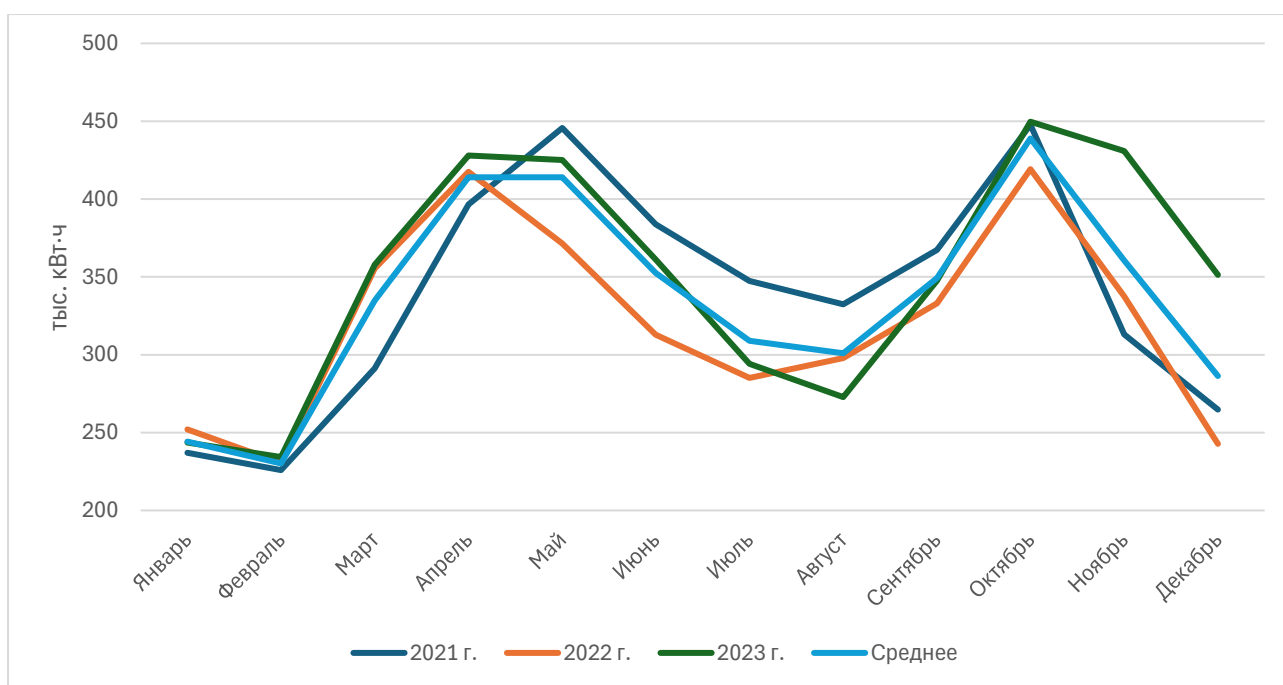


Рисунок 3 – Годовой ход суммарной выработки электроэнергии в Мургабском районе (2021–2023 гг.)

Figure 3 – Annual variation of total electricity generation in the Murghab district (2021–2023)

Анализ представленных данных позволяет сделать следующие выводы:

1. Ярко выраженная сезонность. Максимальная выработка приходится на апрель-май и октябрь (периоды высокой водности и оптимальной солнечной активности). В январе-феврале выработка снижается до 64–68% от среднемесячного уровня, что при одновременном росте потребления создает дефицит мощности.

2. Межгодовая вариабельность. В 2023 году наблюдается существенный рост выработки в ноябре-декабре по сравнению с предыдущими годами, что, вероятно, связано с вводом в

эксплуатацию СЭС-600 и систем накопления, позволивших более эффективно аккумулировать энергию в осенний период.

3. Роль солнечной генерации. По данным 2021–2023 гг., доля СЭС в общей выработке составляла около 8–9%, причем максимальный вклад (до 12%) достигался в переходные месяцы, когда гидрогенерация еще не достигла пика, а солнечная активность уже была значительной.

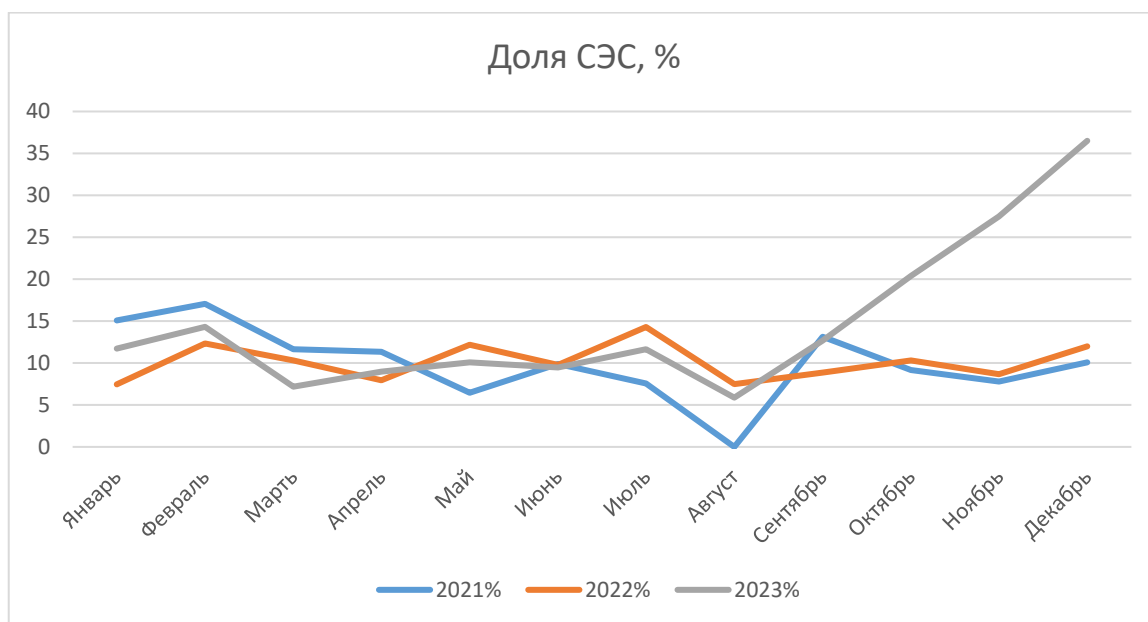


Рисунок 4 – Вклад солнечной генерации в общую выработку электроэнергии по месяцам (2021–2023 гг.)

Figure 4 – Monthly contribution of solar generation to total electricity generation (2021–2023)

Для анализа суточной неравномерности и оценки эффективности систем накопления были использованы данные почасового учета за январь и апрель 2023 г.

Обобщенный суточный график нагрузки и генерации для зимнего периода представлен на рисунках 5-6 [17].

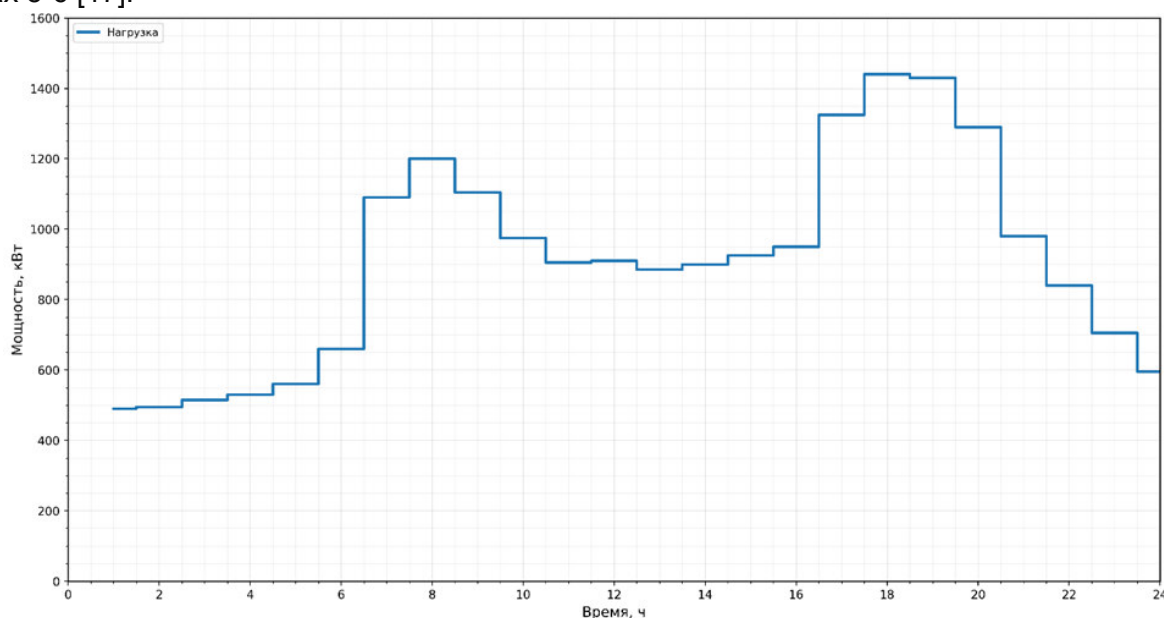


Рисунок 5-Суточный график нагрузки и генерации в зимний период

Figure 5 – Daily load and generation profile in the winter period

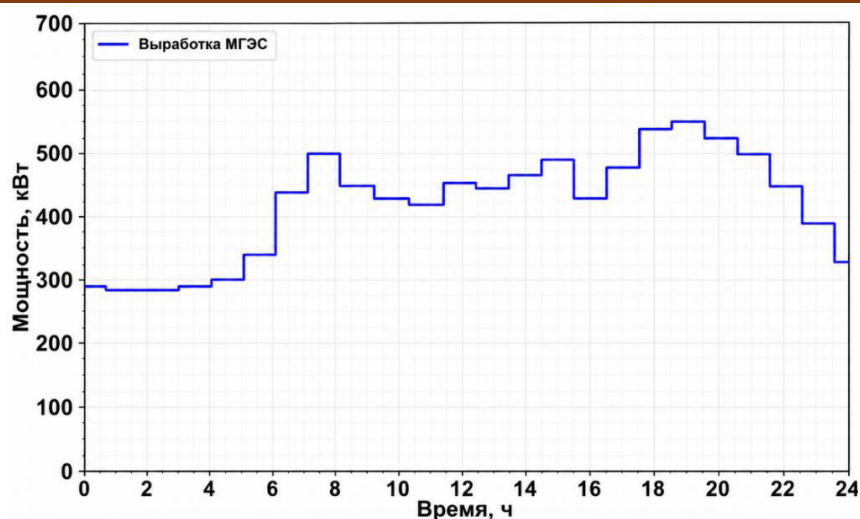


Рисунок 6- Суточный график генерации МГЭС в зимний период
Figure 6 – Daily SHPP generation profile in the winter period

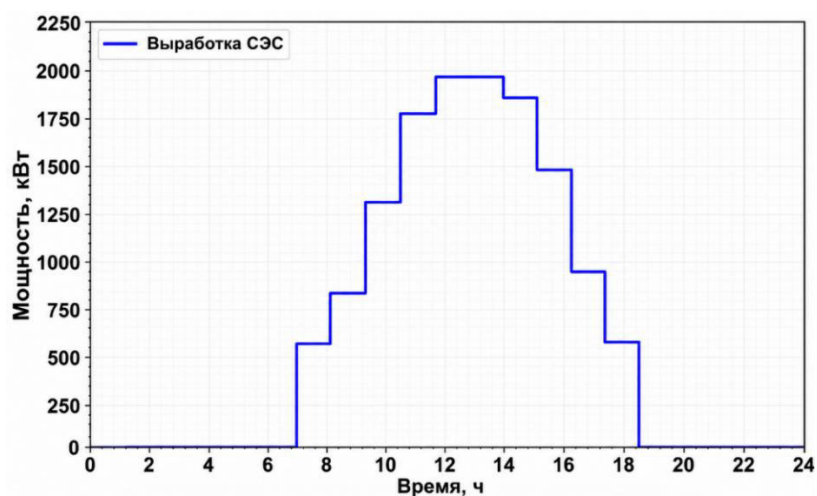


Рисунок 7- Суточный график генерации СЭС в зимний период
Figure 7 – Daily SPP generation profile in the winter period

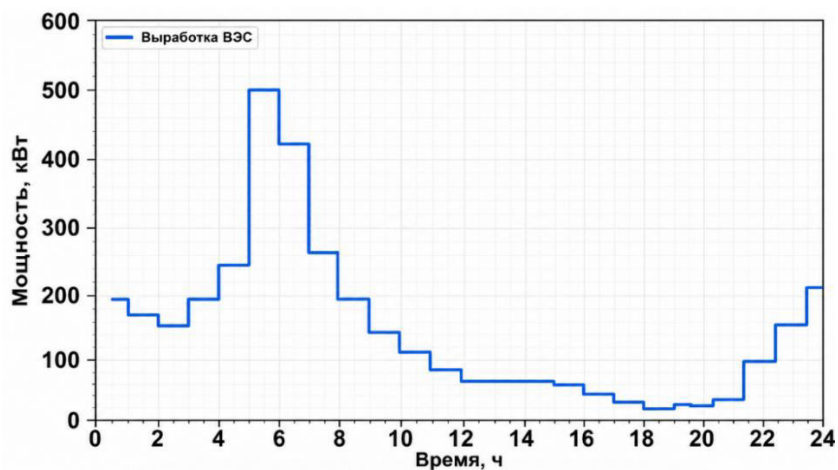


Рисунок 8 – Суточный потенциальный график генерации ВЭС в зимний период
Figure 8 – Daily potential WPP generation profile in the winter period

Характерные особенности суточного графика в зимний период:

– Утренний пик (08:00–10:00) – включение электронагревательных приборов, освещения, приготовление пищи.

– Дневной провал (12:00–15:00) – снижение нагрузки в период максимальной солнечной активности (одновременная генерация СЭС позволяет производить заряд АКБ).

– Вечерний максимум (18:00–06:00) – максимальное потребление при отсутствии солнечной генерации, покрывается за счет разряда АКБ и, при необходимости, дизельной генерации.

Анализ данных января 2023 г. показывает, что суточная неравномерность потребления достигает 3 – 4 – кратной величины: минимальное потребление в ночные часы составляет около 1500 кВт, максимальное в вечерние часы — до 500–600 кВт. При этом выработка СЭС, достигающая в дневные часы 2000 кВт (суммарно по двум очередям), позволяет существенно снизить нагрузку на гидроэлектростанцию и накопить энергию в АКБ для вечернего пика.

Задача оптимизации режимов электропотребления в гибридной энергосистеме Мургабского района формулируется следующим образом: при известных суточных графиках нагрузки потребителей $P_{\Pi}(t)$ и прогнозируемой выработке возобновляемых источников $P_{СЭС}(t)$, $P_{ВЭС}(t)$, $P_{МГЭС}(t)$ определить такие значения мощностей, отбираемых от каждого источника $P_j(t)$, режимы работы аккумуляторных батарей $P_{АКК}(t)$, чтобы суммарные затраты на электроэнергию за расчетный период (сутки) были минимальны при обязательном выполнении балансовых соотношений и технологических ограничений [10-15].

Математическая модель

Основное уравнение энергетического баланса для каждого часа t имеет вид:

$$P_{СИС}(t) + P_{МГЭС}(t) + P_{СЭС}(t) + P_{ВЭС}(t) + P_{Диз}(t) \pm P_{АКК}(t) = P_{\Pi}(t) + \Delta P(t) \quad (1)$$

где знак «+» перед $P_{АКК}(t)$ соответствует разряду аккумуляторной батареи (отдача энергии в сеть), знак «-» – заряду (потребление энергии из сети).

В интегральной форме для суточного интервала:

$$\begin{aligned} \int_0^{24} P_{СИС}(t)dt + \int_0^{24} P_{МГЭС}(t)dt + \int_0^{24} P_{СЭС}(t)dt + \int_0^{24} P_{ВЭС}(t)dt + \int_0^{24} P_{Диз}(t)dt \pm \int_0^{24} P_{АКК}(t)dt \\ = \int_0^{24} P_{\Pi}(t)dt + \int_0^{24} \Delta P(t)dt \end{aligned}$$

Это дает возможность получать энергию из разных источников: энергетические системы Помир Энержи, МГЭС «Мургабского района», ветроустановки, солнечные электростанции, дизельной установки и аккумуляторы, себестоимость которых отличительна. Эффективность от их применения определяется как соотношение полученной энергии различной стоимости для каждого часа применения. Задача носит оптимизационный характер.

Примером могут служить режимы электропотребления Мургаба, для чего примем:

$P_{\Pi i}$ – потребление электроэнергии потребителями Мургабского района.

$P_{СИС i}$ – мощность передачи от энергосистемы системы Помир Энержи;

$P_{МГЭС i}$ – мощность, полученная от МГЭС Мургабского района;

$P_{СЭС i}$ – мощность, полученная от солнечных электростанций;

$P_{ВЭС i}$ – мощность, полученная от ветровых электростанций;

$P_{Диз}$ – мощность, полученная от дизельных генераторных установок;

$P_{АКК i}$ – мощность, полученная от аккумулятора.

Мощность каждого источника в каждый час ограничена техническими параметрами:

$$0 \leq P_{СЭС}(t) \leq P_{max}^{СЭС}(t)$$

$$0 \leq P_{ВЭС}(t) \leq P_{max}^{ВЭС}(t)$$

$$0 \leq P_{\text{Диз}}(t) \leq P_{\text{max}}^{\text{Диз}}(t)$$

$$0 \leq P_{\text{Акк}}^{\text{Разряд}}(t) \leq P_{\text{max}}^{\text{Акк}}(t); 0 \leq P_{\text{Акк}}^{\text{Заряд}}(t) \leq P_{\text{max}}^{\text{Акк}}(t)$$

Дополнительным ограничением выступает энергетический баланс аккумуляторной батареи: изменение степени заряда $E_{\text{Акк}}(t)$ определяется разностью мощностей заряда и разряда с учетом КПД:

$$\frac{dE_{\text{Акк}}(t)}{dt} = \eta_{\text{зар}} P_{\text{зар}}(t) - \frac{1}{\eta_{\text{зар}}} P_{\text{разр}}(t)$$

$$0 \leq E_{\text{Акк}}(t) \leq E_{\text{max}}^{\text{Акк}}(t)$$

В качестве математической модели для выбора источника энергии для нормализации расходов потребителя мы воспользовались системой нелинейных алгебраических уравнений (СНАУ) с возможностью ее преобразования в систему линейных алгебраических уравнений (СЛАУ). Расход электроэнергии за сутки нормируется произведением данных входного вектора производимой/передаваемой электроэнергии и матрицы цен. Ежечасное усредненное значение мощности использованной электроэнергии совпадает с расчетным значением за этот же час. Вышесказанное запишем в следующем выражении:

$$\begin{cases} C_{11} \cdot P_{\text{Сис}} + C_{12} \cdot P_{\text{МГЭС}} + C_{13} \cdot P_{\text{СЭС}} + C_{14} \cdot P_{\text{ВЭС}} + C_{15} \cdot P_{\text{Диз}} + C_{16} \cdot P_{\text{Акк}} = m_1 \\ C_{21} \cdot P_{\text{Сис}} + C_{22} \cdot P_{\text{МГЭС}} + C_{23} \cdot P_{\text{СЭС}} + C_{24} \cdot P_{\text{ВЭС}} + C_{25} \cdot P_{\text{Диз}} + C_{26} \cdot P_{\text{Акк}} = m_2 \\ C_{31} \cdot P_{\text{Сис}} + C_{32} \cdot P_{\text{МГЭС}} + C_{33} \cdot P_{\text{СЭС}} + C_{34} \cdot P_{\text{ВЭС}} + C_{35} \cdot P_{\text{Диз}} + C_{36} \cdot P_{\text{Акк}} = m_3 \\ C_{41} \cdot P_{\text{Сис}} + C_{42} \cdot P_{\text{МГЭС}} + C_{43} \cdot P_{\text{СЭС}} + C_{44} \cdot P_{\text{ВЭС}} + C_{45} \cdot P_{\text{Диз}} + C_{46} \cdot P_{\text{Акк}} = m_4 \\ C_{51} \cdot P_{\text{Сис}} + C_{52} \cdot P_{\text{МГЭС}} + C_{53} \cdot P_{\text{СЭС}} + C_{54} \cdot P_{\text{ВЭС}} + C_{55} \cdot P_{\text{Диз}} + C_{56} \cdot P_{\text{Акк}} = m_5 \\ C_{61} \cdot P_{\text{Сис}} + C_{62} \cdot P_{\text{МГЭС}} + C_{63} \cdot P_{\text{СЭС}} + C_{64} \cdot P_{\text{ВЭС}} + C_{65} \cdot P_{\text{Диз}} + C_{66} \cdot P_{\text{Акк}} = m_6 \end{cases} \quad (2)$$

где – m_1 стоимость потребленной электроэнергии;

$i=1,2,3,4,5,6$ – четыре возможных источника энергии для потребителя.

Применив метод исключения Гаусса, выполняется решение СЛАУ на каждом шаге итерации. Прямой ход требуется свести к нулю под диагональные элементы, а обратным ходом требуется решить уравнения с верхней точки треугольной матрицы. Первым ходом определяется последнее по номеру неизвестное значение.

Минимизация суммарных затрат потребителя за расчетные сутки:

$$M = \sum_{i=1}^{24} (c_{\text{Сис}} \cdot P_{\text{Сис},i} + c_{\text{МГЭС}} \cdot P_{\text{МГЭС},i} + c_{\text{СЭС}} \cdot P_{\text{СЭС},i} + c_{\text{ВЭС}} \cdot P_{\text{ВЭС},i} + c_{\text{Диз}} \cdot P_{\text{Диз},i} + c_{\text{Акк}} \cdot P_{\text{Акк}}) \cdot \Delta t$$

$$\rightarrow \min$$

$$M = \sum_{i=1}^6 \sum_{j=1}^6 C_{ij} \cdot P_j \cdot t \rightarrow \min,$$

где c_j – стоимость электроэнергии от j -го источника (в сомони за 1 кВт·ч); $\Delta t=1$ час.

Стоимость электроэнергии от различных источников существенно различается. Наименьшую себестоимость имеют гидрогенерация (после завершения инвестиционной фазы) и солнечные электростанции. Наиболее высокая стоимость у дизельной генерации из-за затрат на доставку топлива. Стоимость электроэнергии от аккумуляторных батарей определяется затратами на их эксплуатацию и ресурс циклов.

Для численной реализации задача оптимизации сводится к решению системы линейных алгебраических уравнений (СЛАУ) на каждом временном шаге. Вектор мощностей источников представляется в виде:

$$P = [P_{\text{Сис}}, P_{\text{МГЭС}}, P_{\text{СЭС}}, P_{\text{ВЭС}}, P_{\text{Диз}}, P_{\text{Акк}}(t)]^T \quad (3)$$

Матрица цен имеет диагональный вид:

$$C = \begin{pmatrix} c_{11} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & c_{22} & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & c_{33} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & c_{44} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & c_{55} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & c_{66} \end{pmatrix} \quad (4)$$

где c_{11} – цена электроэнергии от системы «Помир Энержи»; c_{12} – от МГЭС Мургаб; c_{33} – от СЭС; c_{44} – от ВЭУ; c_{55} – от ДГУ; c_{66} – от АКБ.

Суммарные затраты за час:

$$M(t) = C \cdot P(t) \cdot \Delta t \quad (5)$$

Результатом оптимизации энергопотребления гибридной энергосистемы Мургабского района Республики Таджикистан при получении потенциальной генерации от различных источников энергии, таких как МГЭС (рисунок 6), СЭС (рисунок 7) и ВЭС (рисунок 8), получим суммарную генерацию, представленную на рисунке 9.

Результаты оптимизации режимов электропотребления в гибридной энергосистеме Мургабского района Республики Таджикистан представлены на рисунке 9. В соответствии с принятой целевой функцией минимизации суммарных затрат на электроэнергию при соблюдении балансовых соотношений и технологических ограничений для каждого часа расчетных суток были определены рациональные значения мощности, отбираемой от МГЭС, СЭС, ВЭС, дизельной генерации и аккумуляторной батареи. Полученный суточный график показывает, что после оптимизации в дневные часы при превышении суммарной генерации над нагрузкой, аккумуляторная батарея функционирует в режиме зарядки, аккумулируя избыточную энергию, преимущественно вырабатываемую возобновляемыми источниками. В вечерние часы, характеризующиеся ростом нагрузки и снижением текущей генерации, АКБ переходит в режим разрядки, компенсируя дефицит мощности. Тем самым обеспечивается более равномерное покрытие графика нагрузки, повышение эффективности использования возобновляемых источников энергии и снижение потребности в дорогостоящей дизельной генерации.

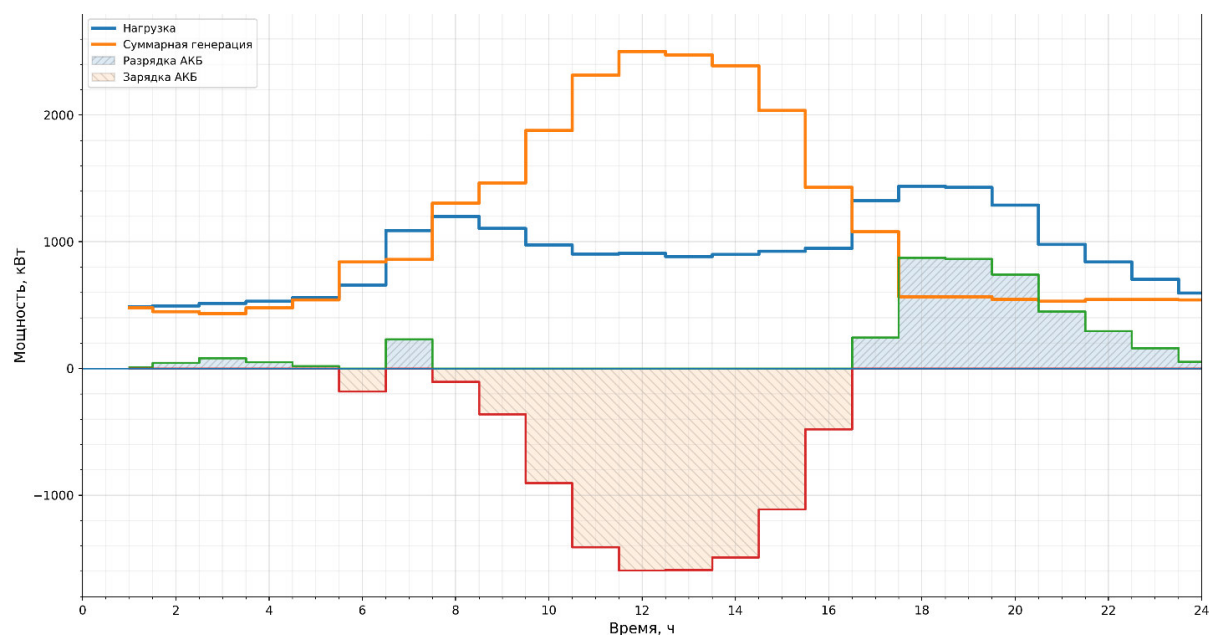


Рисунок 9 – Суточный график нагрузки
Figure 9 – Daily load profile

Суммарная генерация и зарядка/разрядка аккумуляторной батареи Мургабского района Республики Таджикистан после оптимизации режимов работы гибридной энергосистемы.

Полученные результаты согласуются с выводами других исследователей в области оптимизации гибридных энергосистем. В работе Манусова В.З. и Назарова М.Х., [10] показано, что для автономных систем с ВИЭ оптимальное соотношение мощностей гидрогенерации, СЭС и АКБ позволяет снизить потребность в дизельном топливе до 1–5%.

Исследования Хасанзода Н. и Сафарова М.И. [8, 11] демонстрируют эффективность применения линейного программирования для задач распределения нагрузки между источниками различной стоимости. Предложенный нами матричный подход с использованием метода Гаусса является развитием этого направления.

На основе выполненного анализа можно сформулировать следующие рекомендации для оператора энергосистемы («Помир Энержи»):

1. Внедрение автоматизированной системы управления. Разработанная математическая модель может быть положена в основу SCADA-системы, автоматически выбирающей оптимальные режимы заряда-разряда АКБ и включения ДГУ в зависимости от прогноза нагрузки и генерации ВИЭ.

2. Оптимизация тарифной политики. Дифференциация тарифов по времени суток (более высокий тариф в вечерний пик, пониженный – в дневные часы) будет стимулировать потребителей переносить часть нагрузки на дневное время, когда имеется избыток солнечной генерации.

3. Развитие систем накопления. Результаты моделирования показывают, что существующая емкость АКБ используется практически полностью в зимний период. Дальнейшее увеличение емкости позволит еще больше снизить долю дизельной генерации и увеличить генерацию в национальную сеть.

Заключение

Выполненное исследование позволяет сделать следующие основные выводы:

1. Сезонная неравномерность электропотребления в Мургабском районе достигает 30–40%: в зимние месяцы выработка снижается до 64–68% от среднемесячного уровня, что при росте нагрузки создает дефицит мощности.

2. Интеграция солнечных электростанций позволила существенно повысить долю ВИЭ в энергобалансе, однако полное использование их потенциала требует оптимизации режимов работы систем накопления.

3. Разработанная математическая модель на основе балансовых уравнений и системы ограничений позволяет определять оптимальное почасовое распределение нагрузки между источниками генерации с минимизацией суммарных затрат потребителя.

4. Численное моделирование для зимнего периода показало, что оптимизация режимов позволяет снизить расход дизельного топлива на 99% и сохранить надежность электроснабжения.

5. Системы накопления энергии обеспечивают сглаживание суточного графика нагрузки, покрытие вечернего пика и повышение коэффициента использования установленной мощности ВИЭ.

Научная новизна работы заключается в адаптации методов оптимизации к специфическим условиям высокогорной изолированной энергосистемы с учетом почасовых ограничений генерации и сезонной неравномерности нагрузки.

Дальнейшие исследования должны быть направлены на разработку методов краткосрочного прогнозирования выработки ВИЭ с учетом метеорологических факторов, создание автоматизированных систем управления режимами и экономическую оценку оптимальной структуры генерирующих мощностей для перспективного развития энергосистемы Мургабского района.

Рецензент: Абдуллоев Б.П. – к.т.н., начальник отдела международных отношений, реализации проектов и академической мобильности ИТГУК

Литература

1. Сайт Министерства энергетики и водных ресурсов Республики Таджикистан. – URL: <https://www.mewr.tj/?p=6668&lang=tj> (дата обращения: 20.03.2026).

2. Официальный сайт Президента Республики Таджикистан. – URL: <http://www.president.tj> (дата обращения: 20.02.2026).
3. Абдурахманов, А. Я. Возобновляемые источники энергии в Таджикистане / А. Я. Абдурахманов // Вестник Бохтарского государственного университета имени Н. Хусрава. Серия естественных наук. – 2024. – № 2-1 (120). – ISSN 2663-6417.
4. Абдурахманов, А. Я. Рушди гидроэнергетикаи хурд ва манбаҳои алтернативии ноҳияи Мурғоб / А. Я. Абдурахманов, Ф. Н. Кувватов, Д. Мустафоӣ, Ҳ. Билоли // Вестник Бохтарского государственного университета имени Носира Хусрава. Серия естественных наук. – 2024. – № 2-1 (120). – С. 27–30.
5. Махмадов, Ш. С. Моделирование режимов работы МГЭС с учётом колебаний уровня бассейна суточного регулирования / Ш. С. Махмадов, Р. Х. Дирзода, Ш. М. Султонов // Политехнический вестник. Серия: Инженерные исследования. – 2020. – № 2(50). – С. 47–53. – EDN VWPJFH.
6. Диёров, Р. Х. Ветроэнергетический потенциал ГБАО Республики Таджикистан / Р. Х. Диёров, Ш. Р. Гуламов, О. М. Сайфуллоева, Ф. К. Шарипов // Наука и инновация. Серия геологических и технических наук. – 2022. – № 3. – С. 63–70.
7. Официальный сайт исполнительного органа государственной власти ГБАО. – URL: <https://badakhshon.tj/> (дата обращения: 05.03.2026).
8. Сафаров, М. И. Оптимизация распределённой генерации в локальной электроэнергетической системе с возобновляемыми источниками энергии: дис. ... канд. техн. наук: 05.14.01 – Энергетические системы и комплексы / М. И. Сафаров. – Душанбе, 2023. – 158 с.
9. Федоров, М. П. Безуглеродная энергетика как направление развития региона Санкт-Петербург / М. П. Федоров, М. В. Кривошеев // Научно-технические ведомости СПбПУ. Естественные и инженерные науки. – 2018. – Т. 24, № 2. – С. 10–21. – DOI: 10.18721/JEST.240201.
10. Манусов, В. З. Оптимизация режимов электропотребления автономной системы с ВИЭ / В. З. Манусов, М. Х. Назаров // Вестник Иркутского государственного технического университета. – 2020. – Т. 24, № 4. – С. 810–820. – DOI: 10.21285/1814-3520-2020-4-810-820.
11. Хасанзода, Н. Оптимизация режимов электропотребления в интеллектуальных сетях с двусторонним потоком энергии методами искусственного интеллекта: дис. ... канд. техн. наук: 05.14.02 / Н. Хасанзода. – Новосибирск, 2019. – 187 с.
12. Лаврик, А. Ю. Выбор состава ветро-солнечной электростанции с дизельными генераторами / А. Ю. Лаврик, Ю. Л. Жуковский, А. Д. Булдыско // Известия вузов. Проблемы энергетики. – 2020. – Т. 22, № 1. – С. 10–17. – DOI: 10.30724/1998-9903-2020-22-1-10-17.
13. Карамов, Д. Н. Математическое моделирование автономной системы электроснабжения с ВИЭ / Д. Н. Карамов // Вестник ИрГТУ. – 2015. – № 9 (104). – С. 133–140.
14. Национальное информационное агентство Таджикистана «Ховар». – URL: <https://khovar.tj/rus/2020/11/v-tadzhikistane-zarabotala-samaya-vysokaya-v-mire-solnechnaya-elektrostantsiya/> (дата обращения: 02.02.2026).
15. Лоихаи нерӯҳои барқи офтобии Мурғоб / ОАО «Помир Энерджи». – Душанбе, 2024.
16. Погода в Мургабе по месяцам // 365 по Цельсию. – URL: https://pogoda.365c.ru/tajikistan/murgob/po_mesyacam (дата обращения: 10.01.2026).
17. Махмадов, Ш. С. Моделирование режимов работы МГЭС с учётом колебаний уровня бассейна суточного регулирования / Ш. С. Махмадов, Р. Х. Дирзода, Ш. М. Султонов // Политехнический вестник. Серия: Инженерные исследования. – 2020. – № 2(50). – С. 47–53. – EDN VWPJFH.

Reference

1. Website of the Ministry of Energy and Water Resources of the Republic of Tajikistan. URL: <https://www.mewr.tj/?p=6668&lang=tj> (accessed: March 20, 2026).
2. Official website of the President of the Republic of Tajikistan. URL: <http://www.president.tj> (accessed: February 20, 2026).
3. Abdurakhmanov, A. Ya. Renewable Energy Sources in Tajikistan / A. Ya. Abdurakhmanov // Bulletin of Bokhtar State University named after N. Khusrav. Natural Sciences Series. - 2024. - No. 2-1 (120). - ISSN 2663-6417.
4. Abdurakhmanov, A. Ya. Alternative approaches to hydropower engineering / A. Ya. Abdurakhmanov, F. N. Kuvvatov, D. Mustafoi, H. Biloli // Bulletin of Bokhtar State University named after Nosir Khusrav. Series of natural sciences. - 2024. - No. 2-1 (120). - P. 27-30.
5. Makhmadov, Sh. S. Modeling of operating modes of small hydroelectric power plants taking into account fluctuations in the level of the daily regulation basin / Sh. S. Makhmadov, R. Kh. Diyerzoda, Sh. M. Sultonov // Polytechnic Bulletin. Series: Engineering Research. – 2020. – №2(50). – P. 47–53. – EDN VWPJFH.

6. Diyorov, R. Kh. Wind energy potential of GBAO of the Republic of Tajikistan / R. Kh. Diyorov, Sh. R. Gulamov, O. M. Saifulloeva, F. K. Sharipov // Science and Innovation. Series of geological and technical sciences. – 2022. – №3. – P. 63–70.
7. Official website of the executive body of state power of GBAO. – URL: <https://badakhshon.tj/> (date of access: 05.03.2026).
8. Safarov, M. I. Optimization of distributed generation in a local electric power system with renewable energy sources: dis. ... cand. tech. sciences: 05.14.01 – Energy systems and complexes / M. I. Safarov. – Dushanbe, 2023. – 158 p.
9. Fedorov, M. P. Carbon-free energy as a direction for development of the St. Petersburg region / M. P. Fedorov, M. V. Krivosheev // Scientific and technical statements of SPbPU. Natural and engineering sciences. – 2018. – Vol. 24, No. 2. – Pp. 10–21. – DOI: 10.18721/JEST.240201.
10. Manusov, V. Z. Optimization of power consumption modes of an autonomous system with renewable energy sources / V. Z. Manusov, M. Kh. Nazarov // Bulletin of Irkutsk State Technical University. – 2020. – Vol. 24, No. 4. – P. 810–820. – DOI: 10.21285/1814-3520-2020-4-810-820.
11. Hasanzoda, N. Optimization of power consumption modes in smart grids with two-way energy flow using artificial intelligence methods: dis. ... Cand. of Engineering Sciences: 05.14.02 / N. Hasanzoda. – Novosibirsk, 2019. – 187 p.
12. Lavrik, A. Yu. Selection of the composition of a wind-solar power plant with diesel generators / A. Yu. Lavrik, Yu. L. Zhukovsky, A. D. Buldysko // News of universities. Problems of energy. – 2020. – Vol. 22, No. 1. – P. 10–17. – DOI: 10.30724/1998-9903-2020-22-1-10-17.
13. Karamov, D. N. Mathematical modeling of an autonomous power supply system with renewable energy sources / D. N. Karamov // Bulletin of IrSTU. – 2015. – No. 9 (104). – P. 133–140.
14. National Information Agency of Tajikistan "Khovar". – URL: <https://khovar.tj/rus/2020/11/v-tadzhikistane-zarabotala-samaya-vysokaya-v-mire-solnechnaya-elektrostantsiya/> (date of access: 02.02.2026).
15. Weather forecast for Murghab / JSC "Pomir Energy". – Dushanbe, 2024.
16. Weather in Murghab by month // 365 degrees Celsius. – URL: https://pogoda.365c.ru/tajikistan/murghob/po_mesyacam (date of access: 10.01.2026).
17. Makhmadov, Sh. S. Modeling of operating modes of small hydroelectric power plants taking into account fluctuations in the level of the daily regulation basin / Sh. S. Makhmadov, R. Kh. Dierzoda, Sh. M. Sultanov // Polytechnic Bulletin. Series: Engineering Research. – 2020. – No. 2 (50). – P. 47–53. – EDN VWPJFH.

МАЪЛУМОТ ДАР БОРАИ МУАЛЛИФОН-СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ-INFORMATION ABOUT AUTHORS

TJ	RU	EN
Диёрзода Рустам Ҳақималӣ	Диёрзода Рустам Хақимали	Diyorzoda Rustam Khakimali
Донишгоҳи техникии Тоҷикистон ба номи академик М.С. Осимӣ	Таджикский технический университет имени академика М.С. Осими	Tajik Technical University named after academic M.S. Osimi
н.и.т., дотсент	к.т.н., доцент	Candidate of Technical Sciences
E-mail: diyorzoda@gmail.com https://orcid.org/0000-0001-8513-9404		
TJ	RU	EN
Шарифов Бохирдҷон Насруллоевӣ	Шарифов Бохирдҷон Насруллоевӣ	Sharifov Bohirjon Nasrulloevich
Донишгоҳи техникии Тоҷикистон ба номи академик М.С. Осимӣ	Таджикский технический университет имени академика М.С. Осими	Tajik Technical University named after academic M.S. Osimi
н.и.т., муаллими калон	к.т.н., старший преподаватель	Candidate of Technical Sciences senior lecturer
E-mail: energetik_tty@mail.ru https://orcid.org/0000-0003-1998-8306		
TJ	RU	EN
Қувватов Фарух Назриалоевич	Қувватов Фарух Назриалоевич	Khuvatov Farukh Nazrialoevich
Донишқадаи Энергетикии Тоҷикистон	Институт энергетики Таджикистана	Institute of Energy Tajikistan
ассистент	ассистент	assistant
E-mail: farukh.kuvatov@bk.ru		

АНАЛИЗ ТЕХНИКО-ЭКОНОМИЧЕСКОЙ ЦЕЛЕСООБРАЗНОСТИ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ СТАЦИОНАРНОГО ДЕЛЕНИЯ СЕТИ ДЛЯ ОГРАНИЧЕНИЯ УРОВНЕЙ ТОКОВ КОРОТКОГО ЗАМЫКАНИЯ

Дж.Б. Рахимзода, Н.Р. Мукимова, Ю.М. Умарализода, Э.К. Шарипов

Таджикский технический университет имени академика М.С. Осими, г. Душанбе, Республика Таджикистан

В работе выполнен расчёт начальных периодических составляющих токов однофазного и трёхфазного КЗ в электрических сетях 110, 220 и 500 кВ действующей ЭЭС РТ. На основании полученных значений определены граничные - минимальные и максимальные - показатели загрузки выключателей по отключающей способности в узлах всех рассматриваемых классов напряжения. Выявлены подстанции, на которых расчётные значения токов КЗ превышают номинальные токи отключения установленных выключателей. Проведён сравнительный технико-экономический анализ трёх вариантов решения данной проблемы: установки токоограничивающих реакторов, замены выключателей на современные элегазовые и сохранения действующей схемы без изменений. Установлено, что наибольший экономический эффект обеспечивает полная замена масляных выключателей на элегазовые, тогда как наиболее экономичным по капитальным затратам является применение стационарного деления сети (СДС). Обоснована экономическая эффективность использования СДС как метода ограничения токов КЗ в развивающейся ЭЭС РТ.

Ключевые слова: ток короткого замыкания, электроэнергетическая система; высоковольтные выключатели, отключающая способность, технико-экономический расчет, стационарное деление сети.

ТАҲЛИЛИ АСОСНОККУНИИ ТЕХНИКИЮ ИҚТИСОДИИ ИСТИФОДАИ ТАҚСИМОТИ СТАЦИОНАРИИ ШАБАКА БАРОИ МАҲДУД КАРДАНИ САТҲИ ҶАРАЁНҲОИ РАСИШИ КҶТОҲ Ҷ.Б. Раҳимзода, Н.Р. Муқимова, Ю.М. Умарализода, Э.К. Шарипов

Донишгоҳи техникии Тоҷикистон ба номи академик М.С. Осимӣ, ш. Душанбе, Ҷумҳурии Тоҷикистон

Дар мақола ҳисоби таркибиҳои даврии ибтидоии ҷараёнҳои расиши кӯтоҳи якфаза ва сефаза дар шабакаҳои барқии 110, 220 ва 500 кВ-и системаи амалкунандаи энергетикӣ Ҷумҳурии Тоҷикистон (СЭ ҶТ) анҷом дода шудааст. Дар асоси қиматҳои бадастомадаи нишондиҳандаҳои ниҳонӣ – максималӣ ва минималӣ – и дараҷаи боргирии васлақҳо аз рӯи қобилияти ҳомӯшкунӣ дар гиреҳҳои ҳамаи синфҳои шиддати таҳқиқшаванда муайян карда шуданд. Зеристгоҳҳои муайян гардиданд, ки дар онҳо қиматҳои ҳисобшудаи ҷараёнҳои расиши кӯтоҳ аз ҷараёнҳои номиналии ҳомӯшкунӣ васлақҳо зиёд мебошанд. Таҳлили муқоисавии техникаи-иқтисодӣ се варианти ҳалли масъалаи мазкур гузаронида шуд: насби реакторҳои маҳдудкунандаи ҷараён, иваз намудани васлақҳо ба васлақҳои муосири элегазӣ ва нигоҳ доштани схемаи мавҷуда ба тағйирот. Муайян гардид, ки самаравӣ баландтарини иқтисодиро ивазкунии пурраи васлақҳои рағванӣ ба калидҳои элегазӣ таъмин менамояд, дар ҳоле ки аз рӯи хароҷоти сармоягузорию ибтидоӣ варианти аз ҳама иқтисодӣ истифодаи тақсими доимии шабака (ТДШ) ба ҳисоб меравад. Самаранокии иқтисодӣ истифодаи ТДШ ҳамчун усули маҳдудкунии ҷараёнҳои расиши кӯтоҳ дар шароити рушди системаи энергетикӣ Ҷумҳурии Тоҷикистон асоснок карда шудааст.

Калидвожаҳо: ҷараёни расиши кӯтоҳ, системаи электроэнергетикӣ, барқҳомӯшунакҳои баландшиддат, қобилияти ҳомӯшкунӣ, ҳисоби техникаи иқтисодӣ, тақсими стационарии шабака.

ECONOMIC AND TECHNICAL FEASIBILITY ANALYSIS OF USING STATIONARY NETWORK DIVISION TO LIMIT SHORT-CIRCUIT CURRENT LEVELS

J.B. Rahimzoda, N.R. Muqimova, Y.M. Umaralizoda, E.K. Sharipov

Tajik Technical University named after Academician M.S. Osimi, Dushanbe, Republic of Tajikistan

In this paper, the initial periodic components of single-phase and three-phase short-circuit currents have been calculated for 110, 220, and 500 kV electrical networks of the operating EPS RT. Based on the obtained values, the boundary loading indicators of circuit breakers in terms of breaking capacity - both minimum and maximum - have been determined for all considered voltage class nodes. Substations at which the calculated short-circuit current values exceed the rated breaking currents of the installed circuit breakers have been identified. A comparative technical and economic analysis of three alternative solutions has been carried out: the installation of current-limiting reactors, the replacement of oil circuit breakers with modern SF₆ gas-insulated circuit breakers, and the retention of the existing network configuration without modifications. It has been established that the complete replacement of oil circuit breakers with gas-insulated circuit breakers yields the greatest economic effect, while stationary network division (SND) represents the most capital-efficient solution. The economic efficiency of SND as a method for limiting short-circuit current levels in the developing electric power system of the Republic of Tajikistan has been substantiated.

Keywords: short-circuit current, power system, high-voltage circuit breakers, breaking capacity, technical and economic calculation, stationary network division.

Введение

Республика Таджикистан является развивающейся страной и реализует различные государственные стратегии и программы для повышения уровня благосостояния населения. Одной из важнейших среди них является стратегия достижения полной энергетической независимости страны, от которой во многом зависит развитие национальной экономики. В связи с этим Основатель мира и национального единства - Лидер нации, Президент Республики Таджикистан уважаемый Эмомали Рахмон в своих ежегодных посланиях Маджлиси Оли «Об основных направлениях внутренней и внешней политики республики» называет энергетический вопрос ключевым и относит его развитие к числу приоритетов политики Правительства. За последние десять лет генерирующие мощности в электроэнергетической сфере страны увеличились на 1017 МВт. Только за счёт модернизации и реконструкции действующих гидроэлектростанций производственная мощность возросла на 200 МВт. Наряду с увеличением выработки электроэнергии были реализованы и другие важные проекты, включая строительство новых высоковольтных подстанций и линий электропередачи. С учётом растущего спроса на электроэнергию масштабы этой работы расширяются из года в год [1]. Параллельно с этим наблюдается увеличение уровней токов короткого замыкания в сетях различных классов напряжения электроэнергетической системы Республики Таджикистан. Это создаёт реальный риск того, что параметры ранее введённого в эксплуатацию электротехнического оборудования на энергетических объектах, в том числе коммутационные аппараты высоковольтных выключателей, могут не соответствовать новым уровням токов короткого замыкания [2].

Согласно [3, 4], для обеспечения нормальных условий работы электротехнического оборудования при разработке схем развития электрических сетей электроэнергетических систем должны реализовываться следующие методы и мероприятия по ограничению токов короткого замыкания:

1. Переход на более высокий класс напряжения;
2. Применение реакторно-резисторных установок в нейтралях силовых трансформаторов и автотрансформаторов;
3. Стационарное и автоматическое секционирование электрической сети;
4. Применение токоограничивающих реакторов и токоограничивающих устройств;
5. Использование трансформаторов с расщеплёнными обмотками низшего напряжения;
6. Замена коммутационного оборудования с недостаточной коммутационной способностью на новое;
7. Применение вставок постоянного и переменного тока.

Среди перечисленных методов ограничения уровней токов короткого замыкания в электрических сетях наиболее широко распространённым и не требующим дополнительных затрат на приобретение новых коммутационных аппаратов с повышенными номинальными токами отключения является стационарное деление сети (СДС).

В связи с этим целью данной исследовательской работы является определение экономической эффективности применения стационарного деления сети для ограничения уровней токов короткого замыкания в электрических сетях 110 кВ и выше электроэнергетической системы Республики Таджикистан.

Расчет начальных значений периодической составляющей токов КЗ

В данной статье расчёт токов короткого замыкания в сетях высокого напряжения ЭЭС РТ выполнен в соответствии со стандартом IEC 60909:2001. Следует отметить, что согласно [5] для вычисления начальных значений периодических составляющих токов короткого замыкания в узлах низкого напряжения рекомендуется использовать американский стандарт ANSI C37.10, тогда как для узлов высокого напряжения - европейский стандарт IEC 60909.

Необходимо также указать, что для моделей синхронных генераторов, силовых трансформаторов и линий электропередачи использовались параметры, идентичные характеристикам реального оборудования, включая мощности, напряжения короткого замыкания, активные, реактивные и переходные сопротивления и другие величины.

Фрагмент разработанной расчётной математической модели действующей ЭЭС РТ с учётом примыкающих линий электропередачи электроэнергетических систем соседних стран, используемой для вычисления начальных значений периодических составляющих токов трёхфазного и однофазного короткого замыкания, приведён на рисунке 1.

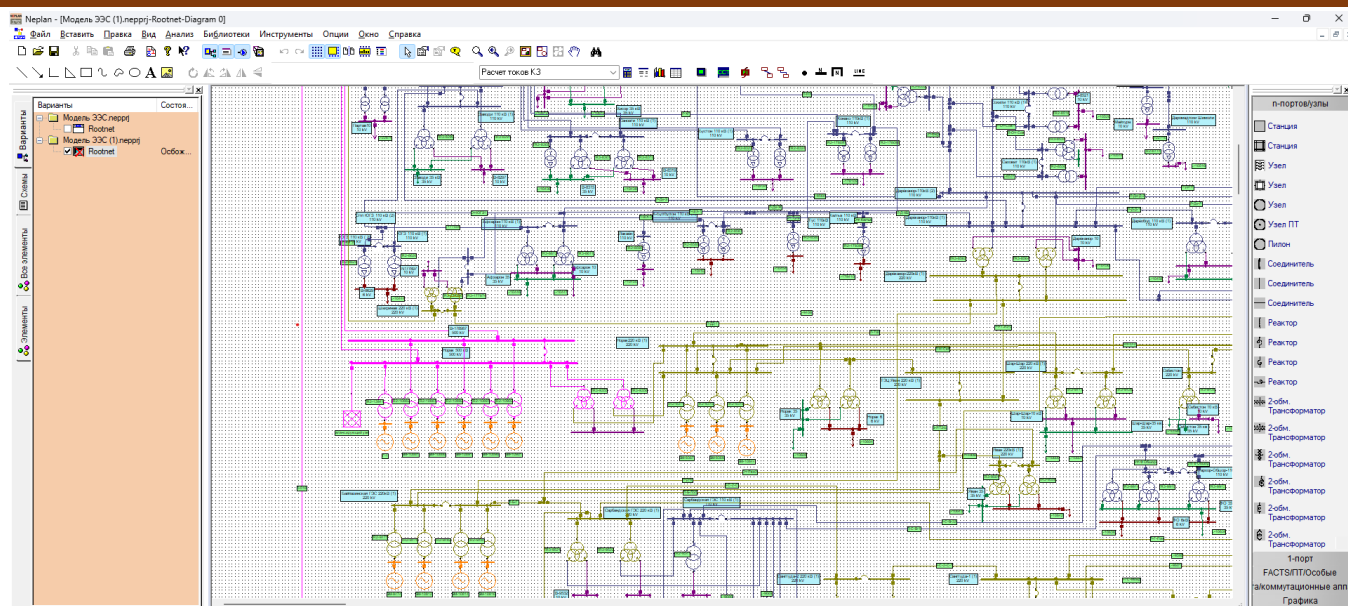


Рисунок 1 – Фрагмент разработанной расчетной модели действующей ЭЭС РТ для определения значений токов КЗ
Figure 1 – Fragment of the developed simulation model of the current EPS of RT for determining short-circuit current values

Представленная расчётная математическая модель (рис. 1) послужила базой для определения начальных значений периодических составляющих токов трёхфазного и однофазного короткого замыкания в узлах 110, 220 и 500 кВ действующей ЭЭС РТ с примыкающими линиями электропередачи электроэнергетических систем соседних стран. При формировании модели учитывались технические параметры 9 электрических станций с 50 синхронными генераторами, свыше 210 трансформаторных подстанций с 400 силовыми трансформаторами и 472 цепей линий электропередачи с номинальными напряжениями 110, 220 и 500 кВ.

В узлах 110 кВ наибольший запас по отключающей способности выключателей по токам короткого замыкания наблюдается на подстанции «Дубеда», где он достигает +98%. Минимальный запас по отключающей способности выключателей для узлов 110 кВ зафиксирован на подстанции «Дарёканор» и составляет до -15%. В узлах 220 кВ максимальный запас зафиксирован на подстанции «Рудаки» и составляет +96%. Минимальный запас по отключающей способности для узлов 220 кВ составляет +21,5% и зафиксирован на КРУЭ-220 кВ Нурекской ГЭС. В узлах 500 кВ максимальный запас зафиксирован на подстанции «Сугд-500» и составляет до +85%. Минимальный запас по отключающей способности для узлов 500 кВ составляет +65% и получен на КРУЭ-500 кВ Нурекской ГЭС.

Из анализа запасов отключающей способности выключателей по токам короткого замыкания в распределительных устройствах видно, что в ряде распределительных устройств запасы находятся на предельном значении либо расчётные токи короткого замыкания превышают номинальные токи отключения установленных выключателей. Так, в распределительных устройствах 110 кВ подстанций Нав, Ориёно-2 и Сироч-Бахром уровни токов однофазного и трёхфазного короткого замыкания приблизительно равны номинальным токам отключения их выключателей, то есть запасы находятся на предельном значении. В распределительном устройстве 110 кВ подстанции «Дарёканор» установлено более десяти масляных выключателей типа МКП-110 с номинальным током отключения 20 кА, тогда как значения уровней токов трёхфазного и однофазного короткого замыкания в данном узле находятся в диапазоне от 20 до 23 кА.

Технико-экономический анализ вариантов модернизации распределительного устройства 110 кВ подстанции «Дарёканор»

Подстанция 220/110/10 кВ «Дарёканор» оснащена двумя секциями шин с двенадцатью отходящими ячейками, двумя вводными ячейками автотрансформаторов АТ-1 и АТ-2 и одним

межсекционным выключателем. В составе коммутационного оборудования распределительного устройства 110 кВ эксплуатируются тринадцать масляных выключателей (один типа У-110 кВ и двенадцать - типа МКП-110 кВ) и два элегазовых выключателя. Длительный срок эксплуатации масляных выключателей обуславливает повышенную вероятность отказов, сопровождающихся значительным экономическим ущербом от недоотпуска электроэнергии потребителям. Для выбора рационального технического решения выполнен сравнительный анализ трёх вариантов. В качестве базового принят Вариант 1 («без изменений»), поскольку именно он определяет уровень ущерба, относительно которого рассчитывается эффект от реализации Вариантов 2 и 3.

Вариант 1 - сохранение действующей схемы (базовый сценарий) - предполагает продолжение эксплуатации 13 масляных выключателей типа МКП-110 кВ без проведения модернизационных мероприятий. Капитальные затраты отсутствуют. Расчёт ущерба ΔW от недоотпуска электрической энергии производится исходя из средней нагрузки подстанции, принятой равной 50% от суммарной установленной мощности ($\Delta P = 400/2 = 200$ МВт), и нормативного времени восстановления масляного выключателя Т типа МКП-110 кВ, составляющего 72 часа.

$$\Delta W = \Delta P \times T \quad (1)$$

$$\Delta W = 200\,000 \times 72 = 14\,400\,000 \text{ кВт}\cdot\text{ч}$$

В расчёт включены только прямые экономические потери: ущерб от недоотпуска электроэнергии по действующим тарифам, ущерб от повреждения оборудования и восстановительные затраты. Косвенный социально-экономический ущерб – потери от остановки производства, нарушения жизнеобеспечения населения и деградации инфраструктуры – намеренно исключён по трём причинам. Во-первых, единой утверждённой методики его стоимостной оценки применительно к энергосистеме Республики Таджикистан не существует. Во-вторых, включение косвенного ущерба пропорционально увеличивает абсолютные значения потерь по всем трём вариантам, не меняя их относительного соотношения и не влияя тем самым на сравнительные выводы. В-третьих, степень этого ущерба по вариантам существенно различается, однако не поддаётся надёжной верификации, что вносило бы систематическую погрешность в расчёт сравнительной эффективности. Принятый подход обеспечивает корректность и воспроизводимость результатов анализа.

Полученный объём ущерба распределяется между категориями потребителей пропорционально их доле в структуре нагрузки: население - 35%, промышленность - 50%, ЖКХ – 15%. Упущенная выгода в сомони/ч определяется как произведение мощности недоотпуска каждой категории (кВт) на соответствующий тариф (сомони/кВт·ч). Результаты расчёта приведены в таблице 1.

Таблица 1 – Ущерб от недоотпуска электроэнергии

Table 1 – Cost of unserved energy

Категория потребителя	Недоотпуск, кВт·ч	Тариф, дирам/кВт·ч	Упущенная выгода, сомони/ч	Ущерб за 72 ч, сомони
Население	5 040 000	41,37	28 959,0	2 085 048
Промышленность	7 200 000	94,65	94 650,0	6 814 800
ЖКХ	2 160 000	41,37	12 411,0	893 592
Итого	14 400 000	-	136 020,0	9 793 440

Ущерб от повреждения оборудования при аварийном отказе масляного выключателя определяется через коэффициент повреждения $K_{пов} = 0,3$, характеризующий долю стоимости нового оборудования, необходимую для восстановления [6, 7]:

$$U_{обор} = K_{пов} \times C_{обор} \times n \times k_{вал} \quad (2)$$

$$U_{обор} = 0,3 \times 40\,000 \times 13 \times 9,5 = 1\,482\,000 \text{ сомони}$$

где: $C_{обор}$ = 40 000 долл. США - стоимость одного элегазового выключателя; n = 13 шт. - количество масляных выключателей; $k_{вал}$ = 9,5 сомони/долл. США - курс валюты [8].

Восстановительный ущерб, включающий затраты на ремонтные бригады, запасные части и простой смежного оборудования, также принят равным 30% стоимости нового оборудования, что даёт $U_{восс} = U_{обор} = 1\,482\,000$ сомони. Равенство этих величин не случайно: согласно нормативной

статистике отказов масляных выключателей типа МКП-110 кВ, затраты на восстановительные работы статистически сопоставимы со стоимостью повреждённых узлов [9, 10].

Совокупный ущерб от одной аварии составляет:

$$U_{\text{общ}} = U_{\text{нед}} + U_{\text{обор}} + U_{\text{восс}} \quad (3)$$

$$U_{\text{общ}} = 9\,793\,440 + 1\,482\,000 + 1\,482\,000 = 12\,757\,440 \text{ сомони}$$

Ущерб от недоотпуска формирует около 77% общих потерь - именно длительность простоя, а не сама вероятность отказа является главным экономическим риском базового сценария. Продолжение эксплуатации без технических мероприятий экономически нецелесообразно.

С учётом статистической вероятности аварии 70% за пятилетний период эксплуатации [11] годовой ущерб составляет:

$$U_{\text{год}} = (U_{\text{общ}} / 5) \times 0,7 \quad (4)$$

$$U_{\text{год}} = (12\,757\,440 / 5) \times 0,7 = 1\,786\,041,6 \text{ сомони/год}$$

Данное значение принято в качестве базового показателя для сравнительной оценки эффективности Вариантов 2 и 3.

Вариант 2 - установка семи токоограничивающих реакторов на отходящих линиях 110 кВ - предполагает установку токоограничивающих реакторов при сохранении действующих масляных выключателей. Реакторы ограничивают токи КЗ, снижая электродинамические и термические нагрузки на контактную систему выключателя в момент отключения. Это уменьшает вероятность аварийного отказа и сокращает объём ремонтных работ, что позволяет принять расчётное время восстановления равным 24 часам [12]. Поскольку масляные выключатели остаются в эксплуатации, вероятность отказа полностью не исключается.

Капитальные затраты на реализацию Варианта 2 формируются по следующим статьям:

$$K_{\text{зат}} = C_{\text{обор}} + C_{\text{мон}} + C_{\text{тамож}} + C_{\text{транс}} + C_{\text{прочие}} \quad (5)$$

Стоимость одного токоограничивающего реактора $C_{\text{обор}}$ принята равной 30 000 долл. США (285 000 сомони при курсе 9,5 сомони/долл.), итого на 7 единиц: 1 995 000 сомони.

Затраты на монтаж $C_{\text{мон}}$ одного реактора рассчитаны по нормативам ГЭСНм (480 чел./ч на три фазы при ставке 40 сомони/ч, работа автокрана - 12 машино-часов по 700 сомони/машино-час, материалы - 10 000 сомони/ед.):

$$C_{\text{мон/ед.}} = 480 \times 40 + 12 \times 700 + 10\,000 = 37\,600 \text{ сомони,}$$

$$\text{итого: } 37\,600 \times 7 = 263\,200 \text{ сомони.}$$

Таможенные пошлины и налоги (25% от стоимости оборудования):

$$7\,500 \times 7 = 52\,500 \text{ долл.} = 498\,750 \text{ сомони.}$$

Транспортные расходы:

$$4\,000 \times 7 = 28\,000 \text{ долл.} = 266\,000 \text{ сомони.}$$

Непредвиденные расходы (10%):

$$4\,500 \times 7 = 31\,500 \text{ долл.} = 299\,250 \text{ сомони.}$$

$$K_{\text{зат}} = 1\,995\,000 + 263\,200 + 498\,750 + 266\,000 + 299\,250 = 3\,322\,200 \text{ сомони}$$

Годовые эксплуатационные затраты по Варианту 2 включают амортизационные отчисления, расходы на техническое обслуживание и потери электроэнергии в реакторах.

$$Z_{\text{год}} = Z_{\text{аморт}} + Z_{\text{обсл}} + Z_{\text{э/э}} \quad (6)$$

Амортизационные отчисления (нормативный срок службы реактора 40 лет): $30\,000 / 40 = 750$ долл./ед. в год, итого: $750 \times 7 \times 9,5 = 49\,875$ сомони/год.

Затраты на техническое обслуживание: $15\,000 \times 7 = 105\,000$ сомони/год.

Потери электроэнергии в реакторах рассчитываются по формуле:

$$W_{\text{э/э}} = 3 \times I_{\text{ср}}^2 \times R_{\text{ф}} \times 8\,760 \times 10^{-3} \quad (7)$$

при среднем токе нагрузки $I_{\text{ср}} = 600$ А и активном сопротивлении одной фазы $R_{\text{ф}} = 0,02$ Ом:

$$W_{\text{э/э}} \approx 189\,000 \text{ кВт}\cdot\text{ч/ед. в год,}$$

$$Z_{\text{э/э}} = 189\,000 \times 0,413 \approx 78\,000 \text{ сомони/ед., итого: } 78\,000 \times 7 = 546\,000 \text{ сомони/год.}$$

$$Z_{\text{год}} = 49\,875 + 105\,000 + 546\,000 = 700\,875 \text{ сомони/год}$$

Наибольшую статью эксплуатационных затрат составляют потери электроэнергии в реакторах (546 000 сомони/год, или 78% от $Z_{\text{год}}$) - известный недостаток данного технического решения.

Установка реакторов обеспечивает двукратное снижение расчётной нагрузки: $\Delta P = 400/2/2 = 100$ МВт. Расчётное время восстановления принято $T = 24$ ч. Суммарный объём недоотпущенной электроэнергии при одной аварии:

$$\Delta W = 100\,000 \times 24 = 2\,400\,000 \text{ кВт} \times \text{ч}$$

Объём распределяется между категориями потребителей в тех же пропорциях, что и в Варианте 1 (население - 35%, промышленность - 50%, ЖКХ - 15%). Результаты расчёта приведены в таблице 2.

Таблица 2 – Ущерб от недоотпуска электроэнергии
Table 2 – Cost of unserved energy

Категория потребителя	Недоотпуск, кВт×ч	Тариф, дирам/кВт×ч	Упущенная выгода, сомони/ч	Ущерб за 24 ч, сомони
Население	840 000	41,37	14 479,5	347 508
Промышленность	1 200 000	94,65	47 325,0	1 135 800
ЖКХ	360 000	41,37	6 205,5	148 932
Итого	2 400 000	-	68 010,0	1 632 240

Ущерб от повреждения оборудования при наличии реакторов характеризуется сниженным коэффициентом повреждения $K_{пов} = 0,2$ (против 0,3 в базовом сценарии), поскольку ограничение тока КЗ уменьшает механические нагрузки на контактную систему [6]:

$$U_{обор} = 0,2 \times 40\,000 \times 13 \times 9,5 = 988\,000 \text{ сомони}$$

Восстановительный ущерб принят равным 30% стоимости нового оборудования:

$$U_{восс} = 0,3 \times 40\,000 \times 13 \times 9,5 = 1\,482\,000 \text{ сомони}$$

$$U_{общ} = 1\,632\,240 + 988\,000 + 1\,482\,000 = 4\,102\,240 \text{ сомони}$$

С учётом вероятности аварии 70% за пятилетний период годовой ущерб составит:

$$U_{год} = (4\,102\,240 / 5) \times 0,7 = 574\,313,6 \text{ сомони/год}$$

Экономический эффект относительно базового сценария:

$$\mathcal{E}_{B1/B2} = U_{B1год} - U_{B2год} \quad (8)$$

$$\mathcal{E}_{B1/B2} = 1\,786\,041,6 - 574\,313,6 = 1\,211\,728 \text{ сомони/год}$$

Срок простой окупаемости:

$$T_{окуп} = K_{зат} / \mathcal{E}_{B1/B2} \quad (9)$$

$$T_{окуп} = 3\,322\,200 / 1\,211\,728 \approx 2,7 \text{ года}$$

Установка токоограничивающих реакторов обеспечивает существенное снижение годового ущерба при относительно невысоких капитальных затратах и коротком сроке окупаемости. Вместе с тем данный вариант не устраняет первопричину риска - физический износ масляных выключателей, а лишь снижает вероятность и масштаб последствий их отказа. Необходимо отметить, что установка токоограничивающих ректоров в электрических сетях 110 кВ и выше могут относительно влиять на процесс отключения КЗ [12, 13].

Вариант 3 - замена тринадцати масляных выключателей на элегазовые ЭГВ-110 кВ - предполагает полную замену масляных выключателей типа МКП-110 кВ на современные элегазовые выключатели типа ЭГВ-110 кВ. Элегазовая среда SF_6 обладает диэлектрической прочностью, втрое превышающей прочность воздуха, что обеспечивает надёжное гашение дуги при больших токах отключения. Герметичная конструкция исключает повреждение прилегающего оборудования. Совокупность этих факторов обуславливает кардинальное снижение как вероятности аварийного отказа, так и масштаба ущерба при его возникновении. Это наиболее капиталоемкий, но и наиболее технически обоснованный вариант.

Капитальные затраты рассчитывается по формуле 5, представленной выше.

Стоимость одного элегазового выключателя составляет 40 000 долл. США (380 000 сомони), итого на 13 единиц: 520 000 долл. = 4 940 000 сомони.

Затраты на демонтаж одного масляного выключателя рассчитаны по нормативам ГЭСНм (213 чел./ч при ставке 50 сомони/ч, 19 машино-часов автокрана и масловоза по 500 сомони/машино-час):

$$Ц_{дем/ед.} = 213 \times 50 + 19 \times 500 = 20\,150 \text{ сомони, итого: } 20\,150 \times 13 = 261\,950 \text{ сомони.}$$

Монтаж одного элегазового выключателя (120 чел./ч при ставке 50 сомони/ч, 10 машино-часов крана по 700 сомони/машино-час, расходные материалы 1 000 сомони):

Цмон/ед. = $120 \times 50 + 10 \times 700 + 1\,000 = 14\,000$ сомони, итого: $14\,000 \times 13 = 182\,000$ сомони.

Совокупные затраты на монтаж и демонтаж: $261\,950 + 182\,000 = 443\,950$ сомони.

Таможенные пошлины и налоги (25%): $130\,000$ долл. = $1\,235\,000$ сомони.

Транспортные расходы: $4\,000 \times 13 = 52\,000$ долл. = $494\,000$ сомони.

Непредвиденные расходы (15%): $6\,000 \times 13 = 78\,000$ долл. = $741\,000$ сомони.

$K_{\text{зат}} = 4\,940\,000 + 443\,950 + 1\,235\,000 + 494\,000 + 741\,000 = 7\,853\,950$ сомони

Годовые эксплуатационные затраты рассчитываются по ранее приведенной формуле 6.

Амортизационные отчисления (нормативный срок службы элегазового выключателя 20 лет): $40\,000 / 20 = 2\,000$ долл./ед. в год, итого: $2\,000 \times 13 \times 9,5 = 247\,000$ сомони/год.

Затраты на техническое обслуживание: $1\,000 \times 13 = 13\,000$ сомони/год.

Затраты на электроэнергию вспомогательных цепей: $350 \times 13 = 4\,550$ сомони/год.

$I_{\text{год}} = 247\,000 + 13\,000 + 4\,550 = 264\,550$ сомони/год

Годовые эксплуатационные затраты по Варианту 3 втрое ниже, чем по Варианту 2, поскольку элегазовые выключатели не создают постоянных потерь электроэнергии и требуют минимального технического обслуживания.

Расчётная нагрузка подстанции принята равной $\Delta P = 100$ МВт, время восстановления - $T = 24$ ч. Поскольку эти параметры совпадают с Вариантом 2, ущерб от недоотпуска электроэнергии по категориям потребителей определяется по таблице 2 и составляет $1\,632\,240$ сомони.

Коэффициент повреждения для элегазового выключателя существенно ниже, чем для масляного: $K_{\text{пов}} = 0,1$ против $0,3$. Это объясняется герметичностью конструкции и отсутствием открытого масляного контура, что исключает разрушение баковых узлов при аварийном отключении:

$Y_{\text{обор}} = 0,1 \times 40\,000 \times 13 \times 9,5 = 494\,000$ сомони

Восстановительный ущерб принят равным 22% стоимости нового оборудования - ниже, чем в Варианте 1, поскольку объём ремонтных работ при отказе элегазового выключателя значительно меньше:

$Y_{\text{восс}} = 0,22 \times 40\,000 \times 13 \times 9,5 = 1\,086\,800$ сомони

$Y_{\text{общ}} = 1\,632\,240 + 494\,000 + 1\,086\,800 = 3\,213\,040$ сомони

С учётом вероятности аварии 20% за 25-летний срок службы элегазового выключателя:

$Y_{\text{год}} = (3\,213\,040 / 25) \times 0,2 = \mathbf{25\,704,3}$ сомони/год

Экономическая эффективность от реализации Варианта 3 относительно базового сценария рассчитывается по формуле 8:

$\Delta B_{1/В3} = 1\,786\,041,6 - 25\,704,3 = 1\,760\,337,3$ сомони/год

$T_{\text{окуп}} = 7\,853\,950 / 1\,760\,337,3 \approx 4,5$ года

Полная замена масляных выключателей на элегазовые формирует максимальный экономический эффект среди рассматриваемых вариантов, а именно $1\,760\,337,3$ сомони/год при приемлемом сроке окупаемости 4,5 года. В отличие от Варианта 2, данное решение устраняет саму причину риска, а не его последствия. Снижение годового ущерба почти в 70 раз по сравнению с базовым сценарием подтверждает высокую техническую и экономическую эффективность варианта на всём жизненном цикле оборудования.

Результаты технико-экономического анализа трёх вариантов модернизации обобщены в таблице 3.

Проведённый технико-экономический анализ трёх сценариев эксплуатации распределительного устройства 110 кВ подстанции «Дарёканор» позволяет сформулировать следующие выводы.

Таблица 3 – Сравнительный анализ вариантов модернизации подстанции 220/110/10 кВ «Дарёканор»

Table 3 – Comparative analysis of modernization options for the 220/110/10 kV substation "Daryokonor"

Показатель	Вариант 1 (без изменений)	Вариант 2 (реакторы)	Вариант 3 (замена МВ)
<i>Капитальные затраты, сомони</i>	0	3 322 200	7 853 950
Количество единиц оборудования, шт.	-	7	13
Стоимость единицы оборудования, сомони/шт.	-	285 000	380 000
Затраты на монтаж (демонтаж), сомони	-	263 200	443 950
Таможенные пошлины и налоги, сомони	-	498 750	1 235 000
Транспортные расходы, сомони	-	266 000	494 000
Непредвиденные расходы, сомони	-	299 250	741 000
Амортизационные отчисления, сомони/год	-	49 875	247 000
Затраты на техническое обслуживание, сомони/год	-	105 000	13 000
Потери электроэнергии, сомони/год	-	546 000	4 550
<i>Итого годовые затраты, сомони/год</i>	-	700 875	264 550
Ущерб при аварии			
Расчётное время восстановления, ч	72	24	24
Расчётная нагрузка подстанции, МВт	200	100	100
Объём недоотпуска электроэнергии, кВт·ч	14 400 000	2 400 000	2 400 000
Ущерб от недоотпуска электроэнергии, сомони	9 793 440	1 632 240	1 632 240
Ущерб от повреждения оборудования, сомони	1 482 000	988 000	494 000
Восстановительный ущерб, сомони	1 482 000	1 482 000	1 086 800
<i>Общий ущерб от одной аварии, сомони</i>	<i>12 757 440</i>	<i>4 102 240</i>	<i>3 213 040</i>
Вероятность аварии за расчётный период	70% / 5 лет	70% / 5 лет	20% / 25 лет
Годовой ущерб, сомони/год	1 786 041,6	574 313,6	25 704,3
Эффективность			
Экономический эффект (к Варианту 1), сомони/год	-	1 211 728,0	1 760 337,3
Простой срок окупаемости, лет	-	2,7	4,5

Вариант 1 - сохранение действующей схемы без изменений - характеризуется наибольшими годовыми потерями: 1 786 041,6 сомони/год. Главным фактором, определяющим столь значительный ущерб, является нормативное время восстановления масляного выключателя МКП-110 кВ - 72 часа. Именно длительность вынужденного простоя формирует около 77% совокупных потерь. Продолжение эксплуатации физически изношенного оборудования без каких-либо технических мероприятий экономически нецелесообразно.

Вариант 2 - установка токоограничивающих реакторов - снижает годовой ущерб до 574 313,6 сомони/год и обеспечивает экономический эффект 1 211 728 сомони/год при сроке окупаемости 2,7 года. Ограничение тока КЗ уменьшает электродинамические нагрузки на контактную систему выключателя, сокращая расчётное время восстановления до 24 часов и вдвое снижая объём недоотпуска электроэнергии. Существенное преимущество варианта - возможность реализации без вывода действующего оборудования из эксплуатации. Вместе с тем физический износ масляных выключателей как первопричина риска остаётся неустранённым. Следует также учитывать, что токоограничивающие реакторы в сетях 110 кВ и выше могут оказывать влияние на процессы отключения КЗ.

Вариант 3 - полная замена масляных выключателей на элегазовые - обеспечивает максимальный экономический эффект: 1 760 337,3 сомони/год при сроке окупаемости 4,5 года. Снижение годового ущерба почти в 70 раз по сравнению с базовым сценарием достигается за счёт трёх факторов одновременно: низкого коэффициента повреждения ($K_{пов} = 0,1$), сокращения времени восстановления до 24 часов и низкой вероятности отказа - 20% за 25-летний срок службы. В отличие

от Варианта 2, данное решение устраняет саму причину риска. При наличии достаточного объёма финансирования Вариант 3 является приоритетным.

С учётом изложенного рекомендуется двухэтапная стратегия. На первом этапе - реализация Варианта 2 как быстрокупаемого решения с немедленным снижением эксплуатационных рисков. На втором этапе, по мере формирования необходимой финансовой базы, переход к полной замене коммутационного оборудования по Варианту 3, обеспечивающей долгосрочную надёжность электроснабжения.

Необходимо подчеркнуть, что настоящий анализ выполнен применительно к одной подстанции. В электрических сетях 110 кВ энергосистемы Республики Таджикистан в настоящее время эксплуатируется более 180 масляных выключателей различных типов, полная замена которых потребует значительных суммарных затрат. С учётом этого в качестве системного решения для ограничения токов КЗ в масштабе всей энергосистемы рассматривается СДС.

Стационарное секционирование электрической сети

СДС является вынужденным эксплуатационным решением для ограничения уровней токов короткого замыкания. Метод реализуется путём отключения шиносоединительных, линейных или секционных выключателей. Ограничение уровней токов короткого замыкания достигается за счёт ликвидации параллельных связей между элементами сети, что увеличивает суммарное электрическое сопротивление пути от источников питания до точки короткого замыкания.

В данной статье для ограничения уровней токов короткого замыкания в электрических сетях 110 кВ были отключены секционные и шиносоединительные выключатели распределительных устройств 110 и 220 кВ подстанций «Нав», «Дарёканор», «Ориёно-2», «Душанбинская ТЭЦ-2» и «Сироч-Бахром».

Результаты расчёта начальных значений периодической составляющей токов трёхфазного и однофазного короткого замыкания с учётом и без учёта применения стационарного деления сети приведены на рис. 2 и 3.

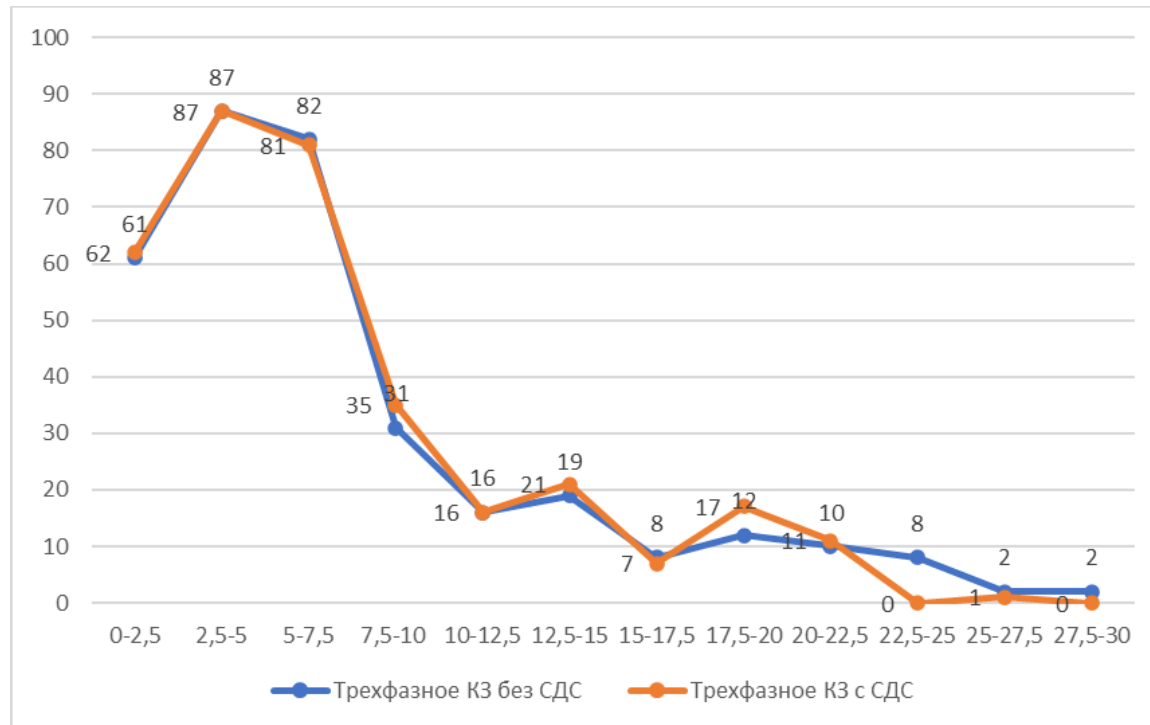


Рисунок 2 – Результаты расчета начальных значений периодической составляющей токов трехфазного КЗ с учетом и без учета использования СДС

Figure 2 – Calculation results of the initial values of the periodic component of three-phase short-circuit currents with and without the use of FCLs

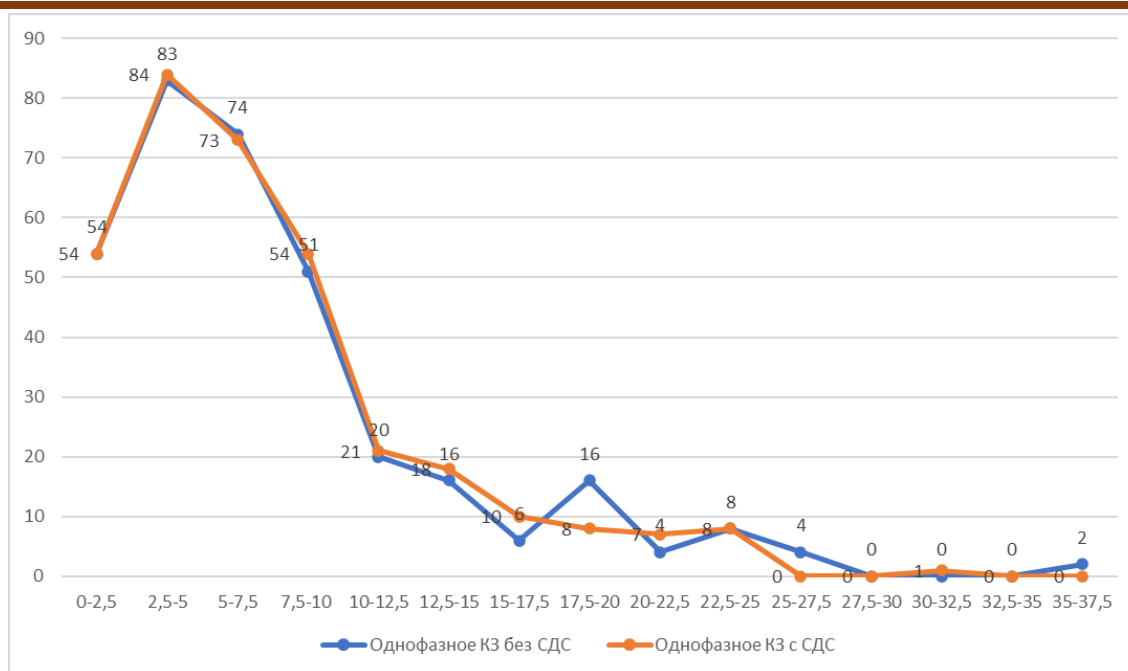


Рисунок 3 – Результаты расчета начальных значений периодической составляющей токов однофазного КЗ с учетом и без учета использования СДС

Figure 3 – Calculation results of the initial values of the periodic component of single-phase-to-ground short-circuit currents with and without the use of FCLs

Из анализа распределения начальных значений периодических составляющих токов однофазного и трёхфазного короткого замыкания видно, что при включённом положении секционных и шиносоединительных выключателей максимальные значения токов короткого замыкания в узлах 110 кВ находятся в диапазоне от 35 до 37,5 кА. С учётом применения СДС этот диапазон сокращается до 30–32,5 кА, что способствует увеличению запаса отключающей способности выключателей.

Необходимо отметить, что с применением СДС расчётные значения периодических составляющих токов однофазного и трёхфазного короткого замыкания на шинах 110 кВ подстанции «Дарёканор» находятся в диапазоне от 14 до 18 кА, то есть нижний предел уменьшился на 6 кА, а верхний - на 5 кА.

Сопоставительный анализ результатов расчётов свидетельствует о высокой комплексной эффективности применения СДС для ограничения как симметричных, так и несимметричных токов короткого замыкания. Внедрение СДС обеспечивает системное перераспределение параметров сети, переводя большинство узлов в более безопасные диапазоны - до 10 кА для трёхфазных и до 14 кА для однофазных токов короткого замыкания. Это подтверждает техническую целесообразность применения СДС как эффективного инструмента снижения аварийных нагрузок на коммутационное оборудование и повышения эксплуатационной надёжности энергосистемы.

Выводы

1. Выполненные расчёты токов короткого замыкания по стандарту IEC 60909 показали, что в ряде узлов электрических сетей 110–500 кВ ЭЭС РТ уровни токов КЗ достигают предельных значений или превышают номинальные отключающие способности действующих высоковольтных выключателей. Наиболее критическая ситуация выявлена в распределительном устройстве 110 кВ подстанции «Дарёканор», где номинальный ток отключения установленных выключателей не соответствует расчётным значениям периодической составляющей токов короткого замыкания.

2. Техничко-экономический анализ показал, что сохранение существующей схемы подстанции «Дарёканор» сопровождается наибольшими годовыми потерями, достигающими 1 786 041,6 сомони/год, вследствие высокой вероятности отказа устаревшего масляного коммутационного оборудования. Установка токоограничивающих реакторов на шинах ОРУ 110 кВ требует капитальных вложений в размере 3 322 200 сомони и обеспечивает годовой экономический эффект 1 211 728 сомони при сроке окупаемости около 2,7 года. Вариант полной замены масляных выключателей на элегазовые характеризуется максимальным годовым экономическим эффектом - 1 760 337,3 сомони/год. Несмотря на значительные капитальные затраты в размере 7 853 950 сомони, срок окупаемости данного варианта составляет около 4,5 года, что подтверждает его высокую долгосрочную экономическую эффективность.

3. Результаты расчёта экономической эффективности рассматриваемых вариантов демонстрируют, что для ограничения уровней токов короткого замыкания наиболее экономичным является установка токоограничивающих реакторов на шинах 110 кВ подстанции «Дарёканор». Однако опыт развитых электроэнергетических систем - таких как системы Бразилии, России, США и других стран - свидетельствует о том, что токоограничивающие реакторы могут оказывать негативное влияние на процесс отключения токов короткого замыкания. Поэтому применение токоограничивающих реакторов в электроэнергетической системе Республики Таджикистан на данном этапе нецелесообразно, поскольку уровни токов короткого замыкания в электрических сетях высокого напряжения не превышают 80 кА.

4. Применение СДС, не требующего дополнительных капитальных затрат, является на данный момент наиболее целесообразным способом ограничения уровней токов короткого замыкания. При его использовании максимальный уровень тока трёхфазного короткого замыкания в электрических сетях 110 кВ снизился на 30,9%, а тока однофазного короткого замыкания - на 39,5%.

Рецензент: Киргизов А.К. — к.т.н., доцент кафедры «Электрические станции» ТПУ имени академика М.С. Осими

Литература

1. Послание Президента Республики Таджикистан уважаемого Эмомали Рахмона об основных направлениях внутренней и внешней политики республики (16 декабря 2025 года). – Душанбе: «Шарки озода», 2025. – 48 с.
2. Рахимзода, Д. Б. Анализ состояния основных элементов электроэнергетической системы Республики Таджикистан / Д. Б. Рахимзода, Ю. М. Курбонов, М. М. Вохидов // Политехнический вестник. Серия: Инженерные исследования. – 2023. – № 2(62). – С. 36–42. – EDN KPPIZO.
3. Положение ПАО «Россети» «О единой технической политике в электросетевом комплексе». – Утв. протоколом от 02.04.2021 № 450. – 2021. – 223 с.
4. РД 34.20.175. Руководящие указания по ограничению токов короткого замыкания в сетях напряжением 110 кВ и выше. – Утв. 17.04.1975. – М.: СПО ОРГРЭС, 1978. – 89 с.
5. Рахимзода, Д. Б. Оценка методик расчётов токов короткого замыкания стандартами IEC и ANSI / Д. Б. Рахимзода, Ю. М. Курбонов, Э. К. Шарипов // Водные ресурсы, энергетика и экология. – 2024. – Т. 4, № 2. – С. 92–98.
6. Неклепаев, Б. Н. Электрическая часть электростанций и подстанций: справочные материалы для курсового и дипломного проектирования: учеб. пособие / Б. Н. Неклепаев, И. П. Крючков. – 5-е изд., стер. – СПб.: БХВ-Петербург, 2013. – 608 с.
7. Гук, Ю. Б. Проектирование электрической части станций и подстанций / Ю. Б. Гук, В. В. Кантан, С. В. Петров. – Л.: Энергоатомиздат, 1985. – 312 с.
8. Национальный банк Таджикистана. Официальный обменный курс сомони. – URL: <https://nbt.tj> (дата обращения: 24.05.2026).
9. РД 34.20.508-88. Правила технического обслуживания и ремонта воздушных линий электропередачи и подстанций напряжением 35–750 кВ. – М.: Энергоатомиздат, 1989. – 176 с.
10. Типовые нормы времени на техническое обслуживание и капитальный ремонт выключателей 110 кВ. – М.: ОРГРЭС, 1987. – 84 с.
11. Гук, Ю. Б. Теория надёжности в электроэнергетике. – Л.: Энергоатомиздат, 1990. – 208 с.
12. Идельчик, В. И. Электрические системы и сети. – М.: Энергоатомиздат, 1989. – 592 с.
13. Волков, М. С. Влияние токоограничивающих реакторов на процесс отключения коротких замыканий в высоковольтных электроустановках / М. С. Волков, Ю. П. Гусев, Ю. В. Монаков, Г. Ч. Чо // Электрические станции. – 2015. – № 7(1008). – С. 6–8. – EDN VIJCSH.

Reference

1. Address by the President of the Republic of Tajikistan, His Excellency Emomali Rahmon, on the Main Directions of the Republic's Domestic and Foreign Policy (December 16, 2025). – Dushanbe: Sharqi Ozod, 2025. – 48 p.
2. Rahimzoda, D. B. Analysis of the State of the Main Elements of the Electric Power System of the Republic of Tajikistan / D. B. Rahimzoda, Yu. M. Kurbonov, M. M. Vokhidov // Polytechnic Bulletin. Series: Engineering Research. – 2023. – No. 2 (62). – pp. 36–42. – EDN KPPIZO.
3. Regulation of PJSC Rosseti "On a Unified Technical Policy in the Electric Grid Complex". – Approved by Protocol No. 450 of April 2, 2021. – 223 p.
4. RD 34.20.175. Guidelines for Limiting Short-Circuit Currents in Networks with Voltage of 110 kV and Above. – Approved on 17.04.1975. – Moscow: SPO ORGRES, 1978. – 89 p.
5. Rahimzoda, D. B. Evaluation of Short-Circuit Current Calculation Methods Using IEC and ANSI Standards / D. B. Rahimzoda, Yu. M. Kurbonov, E. K. Sharipov // Water Resources, Energy and Ecology. – 2024. – Vol. 4, No. 2. – P. 92–98.
6. Neklepaev, B. N. Electrical Part of Power Plants and Substations: Reference Materials for Coursework and Diploma Design: Textbook / B. N. Neklepaev, I. P. Kryuchkov. – 5th ed., reprinted. – St. Petersburg: BHV-Petersburg, 2013. – 608 p.
7. Guk, Yu. B. Design of the Electrical Part of Stations and Substations / Yu. B. Guk, V. V. Kantan, S. V. Petrov. – Leningrad: Energoatomizdat, 1985. – 312 p.
8. National Bank of Tajikistan. Official exchange rate of the somoni. – URL: <https://nbt.tj> (date of access: 24.05.2026).
9. RD 34.20.508-88. Rules for the technical maintenance and repair of overhead power lines and substations with a voltage of 35–750 kV. – Moscow: Energoatomizdat, 1989. – 176 p.
10. Standard Time Standards for Technical Maintenance and Major Repairs of 110 kV Circuit Breakers. Moscow: ORGRES, 1987, 84 p.
11. Guk, Yu. B. Reliability Theory in the Electric Power Industry. Leningrad: Energoatomizdat, 1990, 208 p.
12. Idelchik, V. I. Electrical Systems and Networks. Moscow: Energoatomizdat, 1989, 592 p.
13. Volkov, M. S. The Effect of Current-Limiting Reactors on the Process of Short-Circuit Clearance in High-Voltage Electrical Installations / M. S. Volkov, Yu. P. Gusev, Yu. V. Monakov, G. Ch. Cho // Electric Power Stations. 2015, No. 7 (1008), pp. 6–8.

МАЪЛУМОТ ДАР БОРАИ МУАЛЛИФОН-СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ-INFORMATION ABOUT AUTHORS

TJ	RU	EN
Раҳимзода Чамшед Бобомурод	Раҳимзода Дҷамшед Бобомурод	Rahimzoda Jamshed Bobomurod
н.и.т. дотсент	к.т.н., доцент	Ph.D., associate professor
ДТТ ба номи академик М.С. Осимӣ	ТТУ имени академика М.С. Осими	TTU named after Academician M.S. Osimi
E-mail: jam-rahimov@mail.ru		
ORCID iD: 0000-0002-3901-6339		
TJ	RU	EN
Муқимова Наргис Рустамовна	Муқимова Наргис Рустамовна	Muqimova Nargis Rustamovna
д.и.и., дотсент	д.э.н., доцент	Dr. of Economic Sciences, Associate Professor
ДТТ ба номи академик М.С. Осимӣ	ТТУ имени академика М.С. Осими	TTU named after Academician M.S. Osimi
E-mail: mnargis@yandex.ru		
ORCID iD: 0000-0002-3778-6241		
TJ	RU	EN
Умарализода Юсуф Маҳмадалӣ	Умарализода Юсуф Маҳмадали	Umaralizoda Yusuf Mahmadali
докторанти PhD	докторант PhD	PhD Student
ДТТ ба номи академик М.С. Осимӣ	ТТУ имени академика М.С. Осими	TTU named after Academician M.S. Osimi
E-mail: gym01@mail.ru		
TJ	RU	EN
Шарипов Эркин Курбонович	Шарипов Эркин Курбонович	Sharipov Erkin Kurbonovich
докторанти PhD	докторант PhD	PhD Student
ДТТ ба номи академик М.С. Осимӣ	ТТУ имени академика М.С. Осими	TTU named after Academician M.S. Osimi

КОМПЛЕКС ГИДРОТЕХНИЧЕСКИХ СООРУЖЕНИЙ ДЛЯ ОЧИСТКИ СТОКА РЕКИ ОТ НАНОСОВ И ИХ ИСПОЛЬЗОВАНИЕ В ГОРНОЙ ПРОМЫШЛЕННОСТИ

К.Л. Иноятова, А.А. Гулахмадзода

Институт водных проблем, гидроэнергетики и экологии НАН Таджикистана, Душанбе, Таджикистан

В работе исследованы проблемы эрозии и заиления в бассейне трансграничной реки Зарафшан (Таджикистан, Узбекистан), обусловленные климатическими изменениями, сокращением ледникового стока и ростом концентрации наносов. Проанализировано негативное влияние наносов на водохозяйственную инфраструктуру: выявлено, что они ускоряют износ оборудования, снижают пропускную способность каналов и повышают риски аварий. Исследованы эрозионные процессы с применением моделей RUSLE и SWAT: установлено, что пик концентрации наносов приходится на весенне-летний период, а наиболее уязвимы участки среднего и нижнего течения реки. Определены ограничения традиционных методов очистки стока: обосновано, что они недостаточно эффективны в высокогорных условиях и не предусматривают дальнейшего использования извлечённых наносов. Предложен комплекс гидротехнических сооружений для узкого створа реки: разработана конструкция низконапорной плотины с системой трубопроводов и затворов, позволяющей перехватывать наносы и направлять их на переработку. Обоснована эффективность решения: расчёты подтверждают снижение концентрации взвешенных наносов на 23 %, рост полезного расхода воды, увеличение выработки электроэнергии на ГЭС ниже по течению и экономическую целесообразность использования наносов в горной промышленности.

Ключевые слова: Зарафшан, гидротехнические сооружения, очистка стока, наносы, горная промышленность, устойчивое водопользование, ресурсное использование наносов.

МАЧМЎАИ ИНШООТҲОИ ГИДРОТЕХНИКӢ БАРОИ ТОЗАКУНИИ МАЧРОИ ДАРӢ АЗ ОБОВАРДҲО ВА ИСТИФОДАИ ОНҲО ДАР САНОАТИ КӢҲҚОРӢ

К.Л. Иноятова, А.А. Гулахмадзода

Институти масъалаҳои об, гидроэнергетика ва экологияи АМИТ, ш. Душанбе, Тоҷикистон

Дар мақола масъалаҳои эрозия ва таҳшиншавии таҳшинҳо дар ҳавзаи дарёи фаромарзии Зарафшон (Тоҷикистон, Ўзбекистон) таҳқиқ карда шудаанд, ки бо тағйирёбии иқлим, камшавии ҷараёни оби пирахҳо ва афзоиши консентратсияи таҳшинҳо вобаста мебошанд. Таъсири манфии таҳшинҳо ба инфрасохтори ҳоҷагии об таҳлил карда шуд: муайян гардид, ки онҳо фарсудашиавии таҷҳизотро тезонида, қобиляти гузаронандагии каналҳоро коҳиш медиҳанд ва хавфи ба вучуд омадани ҳолатҳои садамавиро зиёд менамоянд. Равандҳои эрозионӣ бо истифода аз моделҳои RUSLE ва SWAT таҳқиқ карда шуданд: муайян гардид, ки қуллаи баландтарини консентратсияи таҳшинҳо ба давраи баҳору тобистон рост меояд ва қитъаҳои осебпазиртарини дарё қисми миёна ва поёни маҷрои он мебошанд. Маҳдудиятҳои усулҳои анъанавии тозакунии ҷараёни об муайян карда шуданд: асоснок гардид, ки онҳо дар шароити баландкӯҳ самаранокии кофӣ надоранд ва истифодаи минбаъдаи таҳшинҳои хориҷшударо пешбинӣ намеkunанд. Маҷмӯи иншооти гидротехникӣ барои қитъаи танги маҷрои дарё пешниҳод гардид: конструкцияи сарбанди пастфишор бо низоми кубурҳо ва дарвозаҳои танзимкунанда таҳия карда шуд, ки имкон медиҳад таҳшинҳо боздошт шуда, барои коркарди минбаъда равона карда шаванд. Самаранокии қарор асоснок карда шуд: ҳисобҳо коҳиш ёфтани консентратсияи таҳшинҳои ченшуда то 23 %, зиёдшавии сарфи муфиди об, афзоиши истеҳсоли нерӯи барқ дар НБО-ҳои поёноб ва самаранокии иқтисодии истифодаи таҳшинҳоро дар саноати кӯҳӣ тасдиқ менамоянд.

Калидвожаҳо: Зарафшон, иншооти гидротехникӣ, тоза кардани ҷараёни об, таҳшинҳо, истихроҷи маъдан, истифодаи устувори об ва истифодаи захираҳои таҳшинҳо.

HYDRAULIC ENGINEERING STRUCTURE COMPLEX FOR RIVER RUNOFF CLEANING AND USE IN THE MINING INDUSTRY

K.L. Inoyatova, A.A. Gulakmadzoda

Institute of Water Problems, Hydropower and Ecology of the National Academy of Sciences of Tajikistan, Dushanbe, Tajikistan

This study investigates erosion and siltation issues in the transboundary Zerafshan River basin (Tajikistan, Uzbekistan) driven by climate change, reduced glacial runoff, and rising sediment concentration. The negative impact of sediment on water infrastructure was analyzed, revealing that it accelerates equipment wear, reduces canal capacity, and increases the risk of operational accidents. Soil erosion processes were modeled using the RUSLE and SWAT frameworks; the results indicate that sediment concentration peaks during the spring-summer period, with the middle and lower reaches of the river being the most vulnerable. The limitations of conventional runoff treatment methods were identified, demonstrating their low efficiency in high-altitude conditions and their failure to provide for the subsequent utilization of recovered sediment. To address these issues, a complex of hydraulic structures designed for a narrow river reach is proposed, featuring a low-head dam with a system of pipelines and gates to intercept sediment and route it for recycling. The effectiveness of this solution was validated: calculations confirm a 23% reduction in suspended sediment concentration, an increase in beneficial water discharge, higher electricity generation at

downstream hydropower plants (HPPs), and the economic viability of utilizing the recovered sediment in the mining industry.

Keywords: *Zarafshan, hydraulic structures, runoff treatment, sediment, mining, sustainable water use, and resource utilization of sediment.*

Введение

Бассейн реки Зарафшан является трансграничной рекой и находится на территориях стран Республики Таджикистан и Узбекистан. На сегодняшнее время река сталкивается с острой проблемой ускоренной эрозии в верховьях горной части и критическим заилением наносами ирригационных систем и русла в средней и нижней части течения реки. Наблюдения за ледниками Тянь-Шаня показывают, что происходящее потепление климата приводит к их устойчивому сокращению и уменьшению их ледниковых коэффициентов, что в свою очередь приводит к сокращению стока реки. Причины возникновения данной проблемы заключаются в природных и антропогенных факторах. Последствиями возникшей проблемы считается снижение емкости ирригационных каналов, водохранилищ и водозаборных сооружений за счет заиления. Ухудшение качества воды и состояния окружающей среды. Угроза критической инфраструктуре за счет береговой эрозии и селевых потоков. Износ эксплуатируемых сооружений как насосные агрегаты, гидротурбины входящих в состав гидроузлов. Проблема загрязнения речного стока наносами является одной из ключевых задач гидротехнической и экологической инженерии на сегодняшнее время. Особенно это ощущается в горных районах, где интенсивные процессы эрозии и выноса твердых частиц существенно влияют на качество водных ресурсов [1, 2].

Образующиеся наносы в стоке реки характерных для Зарафшана аридных и семиаридных зонах расположения региона представляют собой ценный природный ресурс, который может быть использован в горной промышленности. Как известно, название реки Зарафшан в переводе с персидского означает «золотоносная». В частности, для бассейна реки актуален вопрос комплексного использования гидротехнического строительства и промышленных отраслей. Добыча и переработка ценных компонентов, очистка стока реки от наносов приобретает двукратную значимость – экологическую и экономическую для страны.

Снижение мутности реки путём очистки от взвешенных частиц и очистка стока от реки от наносов представляют собой важное направление в обеспечении устойчивого функционирования гидротехнической отрасли. Содержание взвешенных частиц в водном потоке приводит к ускоренному износу конструктивных и рабочих элементов оборудования, снижению пропускной способности и ухудшению эксплуатационных характеристик. На насосных станциях и гидроэлектростанциях накопление твердых наносов в каналах и резервуарах снижает эффективность работы оборудования. Традиционные методы очистки требуют больших затрат и часто не обеспечивают стабильного удаления осадков. В условиях интенсивного использования водных ресурсов для ирригации и энергетики поддержание оптимального качества воды становится ключевым фактором долговечности инженерных объектов [3, 4].

В мировой практике применяются различные методы очистки стока – отстойники, фильтрационные системы, гидроциклоны, однако их эффективность в условиях высокогорных бассейнов остаётся ограниченной. Существующие методы, такие как простые отстойники, часто работающие в периодическом режиме (требуют отключения для очистки), не справляются с большим объёмом мелкофракционных наносов (образованных за счет таяния ледников), характерных для Зарафшана. А также, исходя их характерной геологии местности, актуален вопрос комплексного использования гидротехнических сооружений в горном деле при добыче полезных ископаемых металлов и минералов, в частности золота и ценных редких металлов, содержащиеся в составе формирующихся наносов.

Большинство существующих решений не предусматривает комплексного подхода к дальнейшему использованию извлечённых наносов (в виде ила или песка). Целью настоящего исследования считается разработка и обоснование комплекса гидротехнических сооружений, обеспечивающего эффективную очистку стока реки от наносов и их рациональное использование в горной промышленности. Для достижения поставленной цели следует разработать инженерные решения по их эффективному извлечению, оценить возможности применения очищенных наносов в промышленности и определить экологическую и экономическую целесообразность предложенного комплекса.

Научная новизна исследования заключается в интеграции процессов очистки и повторного использования наносов, что позволяет повысить устойчивость водохозяйственных систем и снизить нагрузку на окружающую среду. Актуальным вопросом является создание благоприятных условий для строительства и эксплуатации комплекса гидротехнических сооружений, обеспечение

эффективной борьбы с донными и поверхностными наносами перед водоприемниками водозаборных сооружений, бесперебойной работы гидротехнических сооружений и насосных станций (гидроустановок и насосных агрегатов), увеличения срока службы, а также комплексного использования с рядом смежных отраслей промышленности. Техническим результатом исследования является уменьшение количества донных и поверхностных наносов, содержащихся в стоке реки с возможностью дальнейшего их использования в переработке ценного компонента металлоносных песков с сокращением затрат на водоподготовку и водообеспечение обогатительного процесса.

Нетрадиционный способ возведения и использования гидротехнического сооружения в совокупности с горнодобывающей промышленностью, в частности к разработке россыпных месторождений и техногенных накоплений минерального сырья с последующим использованием создает благоприятную среду для увеличения забора воды в жестких природных условиях. Данное сооружение может быть использовано на головных водозаборных узлах, ирригационных отстойниках, головных регуляторах для автоматизации промыва их от донных и поверхностных наносов. Известно, что добыча и переработка металлоносных песков из россыпей включает в себя возведение гидротехнических сооружений в виде дамб, плотин, руслоотводных канав, выемку исходных песков, их транспортирование к месту переработки, классификацию, подачу классифицированных песков и воды на обогатительное оборудование типа шлюза для промывки в гидродинамическом потоке, удаление хвостов и концентрата. Известные комплексы для переработки песков, включающие выемочное, транспортирующее, классифицирующее устройства исходных песков, систему подачи воды, обогатительное устройство в виде шлюза, оборудование для удаления хвостов переработки и концентрата. Недостатками этих решений являются высокие затраты на водоподготовку и водообеспечение обогатительного процесса, удаление хвостов промывки, а при переработке металлоносных песков в горных или предгорных районах на транспортировку исходных песков из мест периодической добычи в специально-учрежденный комплекс переработки [5, 6].

Предлагаемый комплекс гидротехнических сооружений есть модульное, многоуровневое решение, фокусирующееся на максимальном перехвате донных и поверхностных наносов с перенаправлением их в современные системы промывки золотоносных песков в самом узком створе реки Зарафшан. Система сооружений включает возведение дамбы на самом узком створе реки с образованием накопителя воды, установку устройства напорных трубопроводов в основание тела дамбы с обратным клапаном, а также холостым водосбросом с возможностью переброса воды в нижний бьеф вниз по течению реки, выемку песков и иловых отложений, их транспортирование на поверхность дамбы с подачей в обогатительное устройство с последующим использованием.

Материалы и методы исследования

Методологическая основа работы опирается на комплексный подход, сочетающий лабораторные исследования и математическое моделирование гидродинамических процессов. Такой подход обеспечивает воспроизводимость результатов и позволяет оценить эффективность проектируемого комплекса гидротехнических сооружений в реальных условиях эксплуатации.

Объектом исследования является бассейн реки Зарафшан (см. рис. 1), в частности участок реки с самым узким створом до створа предполагаемого проектирования Яванской ГЭС, характеризующийся интенсивным выносом наносов вследствие эрозионных процессов. Полученные данные из моделей RUSLE и SWAT позволили классифицировать участки с наибольшим риском и образованием наносов. Для оценки эффективности очистки стока применялись гидравлические модели, основанные на уравнениях движения взвешенных частиц в потоке. Использовались программные комплексы ArcGIS, SWAT и HEC-RAS, позволяющие моделировать пространственное распределение наносов и прогнозировать их осаждение в проектируемых сооружениях. Моделирование проводилось в условиях различных гидрологических сценариев, что обеспечило комплексную оценку устойчивости системы [7, 8].

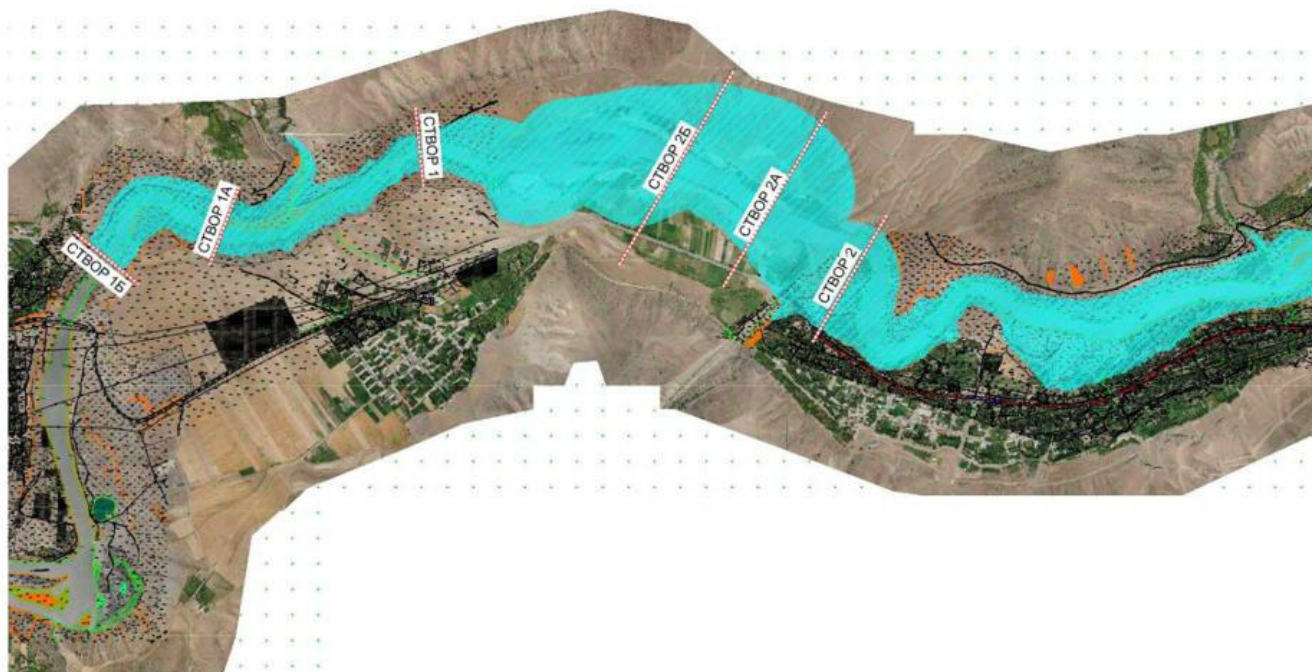


Рисунок 1 – Обиций план исследуемого участка реки Зарафшан. Порядок рассмотрения створов назначен по течению реки – от нижнего к верхнему

Figure 1 – General plan of the studied section of the Zerafshan River. The order of cross-section evaluation is assigned along the river flow – from downstream to upstream

На основе анализа данных предлагается решение возведения нетрадиционного комплекса гидротехнических сооружений, целью которого является разработка конструкции по управлению водным потоком, увеличению пропускной способности путем уменьшения концентрации донных и поверхностных наносов в стоке реки с возможностью их дальнейшей переработки по извлечению ценных компонентов металлоносных песков, а также увеличению выработки электроэнергии на ГЭС. Поставленная цель достигается проектированием и строительством сооружения в виде низконапорной бетонной плотины, в теле которой монолитно установлены напорные трубопроводы, оснащенной такими функциональными устройствами как сороудерживающие решетки, плоские металлические и аварийно-ремонтные затворы, водоподводящий, водоотводящий и сбросной каналы, напорные трубопроводы и насосные агрегаты.

Для каждого элемента комплекса определены технические параметры: объём, скорость осаждения, коэффициент очистки. Особое внимание уделялось интеграции сооружений в существующую водохозяйственную инфраструктуру и минимизации экологических рисков. Эффективность предлагаемого комплекса оценивается по совокупности следующих показателей: уровень снижения концентрации наносов в стоке реки, экономическая целесообразность использования извлеченных из воды материалов в горной промышленности. А также экологическая сторона аспекта устойчивости предложенных решений. Сравнение полученных результатов исследования с нормативными показателями качества воды позволяет подтвердить целесообразность предлагаемого комплекса сооружений современным требованиям водохозяйственной практики.

В исследовании приведена оценка влияния эрозии грунта и склонов на возникновение наносов в стоке реки. Как выявлено, после осушения около 50% общей площади бассейна эрозивные процессы переходят в дренажную зону и приводят к деградации сельскохозяйственных земель. Наиболее пострадавшими районами и участками от влияния эрозийных процессов считаются участки среднего и нижнего течения реки. Если рассмотреть общую картину, то можно увидеть что наблюдается рост средней эрозии грунта. Согласно созданной эмпирической модели эрозии RUSLE и оценке эрозивности можно увидеть участки, подаваемые воздействию эрозии (см. рис.2). Факторы, влияющие на процесс эрозии согласно наблюдениям за период 2000–2024 годов, максимальное значение среднегодового количества осадков составляло 603,905 мм, что соответствует юго-западной части бассейна. Как правило, наименьшее количество осадков наблюдалось в средней

части по течению бассейна в южных и юго-восточных районах бассейна. В исследуемой области коэффициент растворимости почвы (К) варьировался от 0,018 до 0,021; Как правило, 0 означает воду и водоёмы. Почвы бассейна содержали песок (58,9%), ил (29,9%) и глину (43,4%). Значения потенциальной деградации почвы и факторов риска (%) LS категорий склонов (< 5, 5–20, 21–40, 41–70, > 70) были связаны с вершинами гор высотой до 4299 м. Землепользование и покрытие земель в исследуемой зоне были классифицированы на 7 типов, при этом наибольшая доля (60,1%) приходилась на участок без земельного покрова. Следует отметить, что исследуемая территория расположена в гористой местности. Пахотные земли (16,7%), леса (0,2%), голые (60,1%), луга (10,9%), постоянный ледниковый снег (6,7%), водоём (0,1%), и кустарники (5,3%). Согласно некоторым исследованиям, плотность фактора С постепенно увеличивалась от нижних к верхним районам, а наибольшая плотность наблюдалась в густых лесах на горах. С-фактор в объекте исследования варьировался от 0 до 0,9 [9, 10, 11].

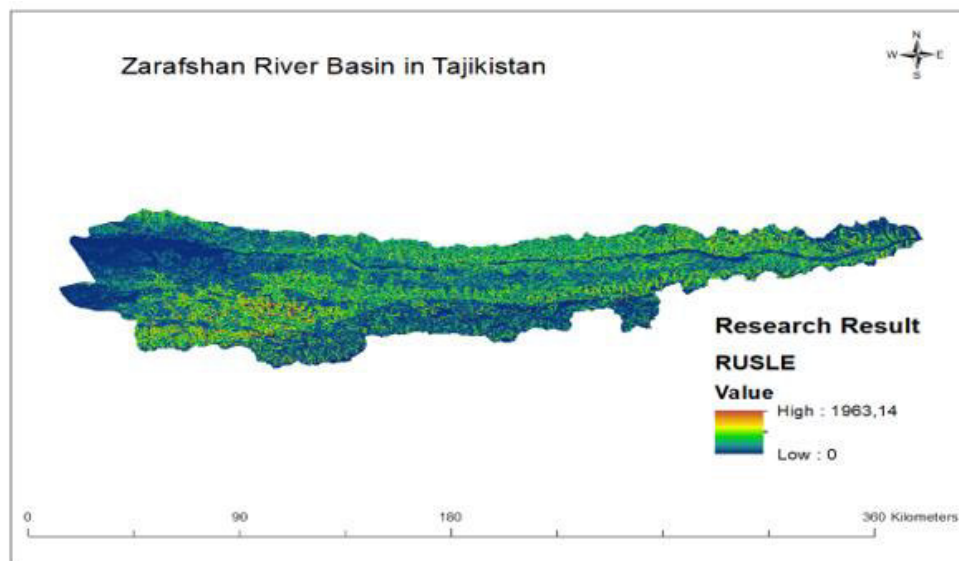


Рисунок 2 – Эмпирическая модель RUSLE бассейна реки Зарафшан
Figure 2 – Empirical RUSLE model of the Zeravshan River basin

Конечным результатом созданной модели RUSLE определяется, что бассейн реки Зарафшан можно разделить на 5 участков, где эрозия грунта очень низкая, умеренная, сильная и экстремальная.

В исследовании была разработана расчётно-аналитическая схема, предназначенная для моделирования процессов осаждения и транспортировки наносов в условиях горных рек. Модель основана на сочетании гидравлических уравнений движения взвешенных частиц и эмпирических зависимостей, полученных в ходе полевых наблюдений. В её структуру включены блоки для оценки гранулометрического состава наносов, расчёта скорости осаждения в отстойниках, а также прогнозирования распределения твёрдых частиц по длине русла. Применение данного метода позволило интегрировать результаты в единую систему, обеспечивающую воспроизводимость расчётов и возможность адаптации модели к различным гидротехническим сценариям и конвертации анализа в число наносов.

Наиболее близким по технической сущности является сооружение для приема воды из горных и предгорных рек для малых ГЭС, состоящее из водозаборного сооружения и паводкового водосброса. Водозабор поверхностного стока выполнен в виде заглубленной галереи, частично перекрытой заборными решетками. Сооружение на пролеты разделяется бычками, железобетонными полами с решетками в верхней части стенок или металлическим каркасом с металлическими щитами с напорной стороны. Водозабор для подрусловых вод выполнен в виде труб для забора подруслового потока, расположенных ниже уровня земли. При этом входная часть защищена обратным фильтром. На выходе (в галерее) трубы перекрываются заслонкой, которая

может быть выполнена в виде задвижки, регулируемой запорной арматурой из смотрового колодца, расположенного в непосредственной близости, или обратным клапаном, работающим в автоматическом режиме.

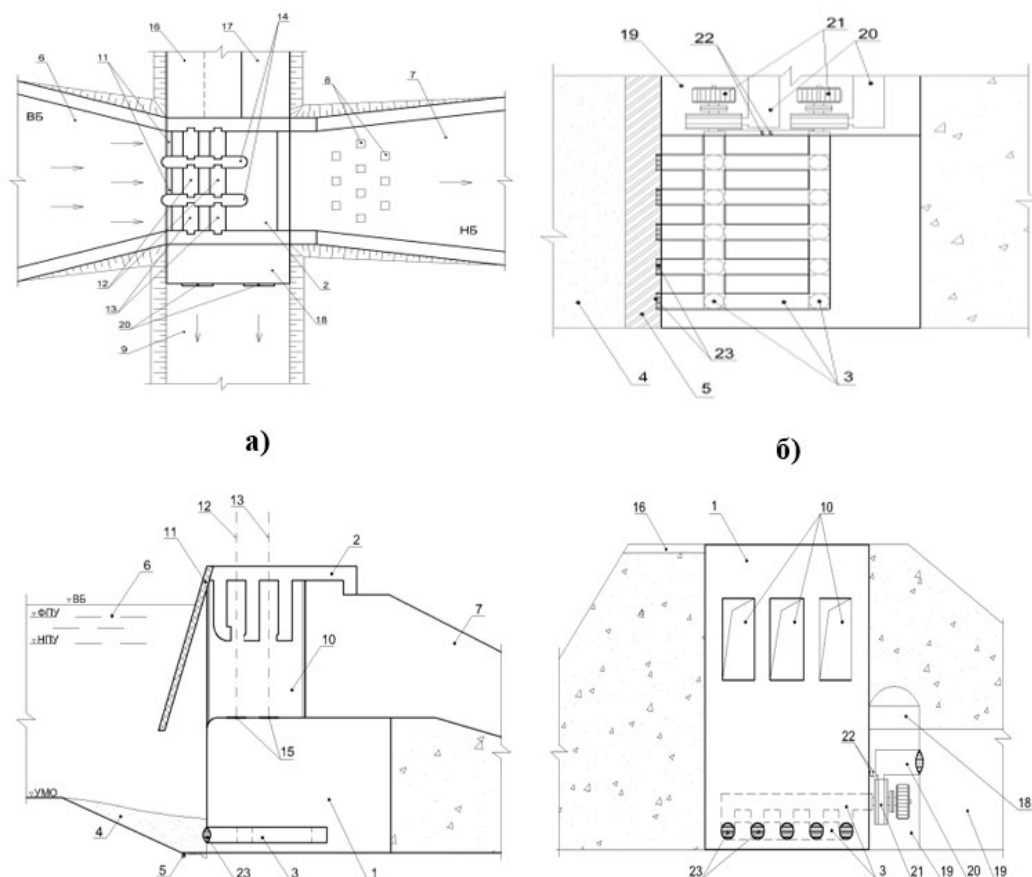


Рисунок 3 – а) план водозаборного сооружения, где ВБ – верхний бьеф, НБ – нижний бьеф, б) продольный разрез водозаборного сооружения, где УМО - уровень мертвого объема, ФПУ - форсированный подпорный уровень, НПУ - нормальный подпорный уровень, в) схема расположения труб и соединения с напорным трубопроводом (вид сверху), г) поперечный разрез водозаборного сооружения.

1) низконапорная бетонная плотина; 2) холостой водосброс; 3) трубы; 4) призма наносов; 5) понур; 6) водоподводящий канал; 7) водоотводящий канал; 8) водобойные колодцы; 9) сбросной канал; 10) камеры; 11) сороудерживающие решетки; 12) металлические плоские затворы; 13) аварийно-ремонтные затворы; 14) железобетонные бычки; 15) пазы затворов; 16) автодорога; 17) монтажная площадка; 18) смотровой колодец; 19) галерея; 20) напорные трубопроводы; 21) насосный агрегат; 22) запорная арматура; 23) обратный клапан.

Figure 3 – a) Plan of the water intake structure, where HW – headwater, TW – tailwater, b) longitudinal section of the water intake structure, where DSL – dead storage level, MWL – maximum water level, FSL – full supply level, c) layout of pipes and connection to the pressure pipeline (top view), d) cross-section of the water intake structure.

Legend: 1) low-head concrete dam; 2) auxiliary spillway (or service spillway); 3) pipes; 4) sediment prism; 5) upstream apron (or fore-apron); 6) water inlet canal (or intake canal); 7) water outlet canal; 8) stilling basins; 9) discharge canal; 10) chambers; 11) trash racks; 12) flat metal gates (or slide gates); 13) emergency-repair gates (or bulkhead gates); 14) reinforced concrete piers; 15) gate slots (or gate grooves); 16) roadway; 17) service platform (or assembly area); 18) inspection manhole; 19) gallery; 20) pressure pipelines; 21) pumping unit; 22) valves (or shut-off valves); 23) check valve (or non-return valve).

Для поднятия уровня грунтовых вод и направления их в трубопровод от сооружения предусмотрена шпунтовая стенка. Недостатком такой конструкции является большой вес, материалоемкость, сложность устройства, а также ограничение по забору только поверхностного стока, что не позволяет использовать максимальный потенциал водотока [12].

Вход в трубы для забора водного потока с содержанием донных наносов (призма наносов) на 0,5 м выше отметки понурной плиты, осуществляющей защиту от подмыва грунта под низконапорной плотиной и которым оснащен водоподводящий канал. На дне водоотводящего канала установлены (рис. 3) несколько водобойных колодцев, служащих гасителями энергии водного потока. С боковой стороны сооружения предусматривается сбросной канал, выполняющий роль сброса наносов и транспортировки их для дальнейшего использования в горной промышленности. Водоподводящий канал выполнен с уклоном и осуществляет плавный подвод и концентрацию водного объема перед плотиной. В верхней части плотины с холостым водосбросом перед камерами пропуска воды установлены сороудерживающие решётки, металлические плоские затворы и аварийно-ремонтные затворы, разделенные на пролеты железобетонными бычками. Железобетонные бычки служат опорной стенкой для установления пазов затворов и разделительными устоями с напорной стороны сооружения. Количество пролетов зависит от ширины реки и расходов потока. Размеры плоских затворов подбираются исходя из ширины пролета, величины напора и удобства маневрирования. Сбоку к плотине подведена автодорога для обслуживающего транспорта, рядом с которой расположена монтажная площадка, необходимая для маневрирования, монтажа/демонтажа оборудования или перемещения плавающего мусора и крупных поверхностных наносов. Смотровой колодец, расположенный смежно с галереей, обеспечивает доступ к напорным трубопроводам для перекачки донных наносов, присоединенным к насосным агрегатам и запорной арматуре, установленным в данной галерее с выходом в сбросной канал. Входы труб для забора водного потока оснащены обратными клапанами.

Гидротехническое сооружение размещается в пределах поймы и поперек русла реки и функционирует следующим образом. Через отверстия труб водный поток с помощью насосного агрегата попадает в напорные трубопроводы, откуда выкачивается в сбросной канал. Откачанная вода с наносами далее направляется в россыпные месторождения для дальнейшей переработки на предмет извлечения полезных ископаемых. Удаление наносов перед плотиной осуществляется путем создания высоких придонных скоростей воды за счет кинетической энергии водного потока. Плоские и аварийно-ремонтные затворы в случае аварийных ситуаций или ремонтных работ позволяют регулировать горизонты и расход воды. Для маневрирования, монтажа/демонтажа оборудования, перемещения плавающего мусора и крупных взвешенных поверхностных наносов служит монтажная площадка, а также автодорога для проезда к сооружению.

Регулирование распределения расходов между сбросом и водозабором осуществляется в автоматическом режиме. Во время паводков трубы для забора водного потока, защищенные от обратного течения при помощи обратных клапанов, перекрываются запорной арматурой, расположенной в галерее. Открываются плоские затворы и осуществляется забор поверхностного стока. В меженный период поверхностный сток уменьшается, в некоторых районах он проходит в виде тонкого ручья. В период маловодья закрываются плоские металлические затворы и открываются трубы для забора водного стока с донными наносами. На данном этапе происходит очистка стока реки от донных наносов в виде ила или песка. Аварийно – ремонтные затворы остаются постоянно открытыми и используются они только в случае аварийных ситуаций, ремонта и обслуживания плоских металлических затворов.

Результаты исследования

Периодическая очистка стока реки от наносов, снижение мутности воды и очистка от взвешенных частиц в виде мусора способствуют бесперебойной эксплуатации насосных станций и гидроэлектростанции. В свою очередь это позволяет уменьшить их воздействие на составляющую часть оборудования, повышает эффективность работы, уменьшает затраты на техническое обслуживание и повышает срок службы рабочих механизмов. Таким образом, результатом исследования следует, что мероприятия по строительству комплекса гидротехнических сооружений в совокупности с горным делом оказывают благоприятное воздействие на надежность и экономичность гидротехнической и ирригационной инфраструктуры страны в целом.

В ходе проведённых исследований полученные данные позволяют оценить эффективность проектируемого комплекса гидротехнических сооружений для очистки стока реки от наносов и их дальнейшего использования в горной промышленности.

Данная конструкция позволяет увеличить полезный расход воды, очищенной от донных и поверхностных наносов за счет забора как поверхностного стока, так и грунтовых вод, имеет низкую себестоимость, простату в ремонте, устойчивость и длительное время воспринимает воздействие потока, не теряя своей работоспособности. Хорошо вписывается в ландшафт местности, ограничивая попадание склонной эрозии грунта и мусора в напорную деривацию. Обеспечивает бесперебойную эксплуатацию насосных агрегатов в насосных станциях, увеличивает выработку электроэнергии в гидроэлектростанциях, расположенных ниже по течению реки. При этом откачанный донный и поверхностный нанос направляется на объект по подготовке и переработке на предмет извлечения ценных компонентов.

Применение данной конструкции позволяет получить несложное в изготовлении, надежное в эксплуатации водозаборное сооружение, способное увеличить расход воды за счет забора и очищения воды от поверхностных и донных наносов, а также взвешенных частиц в виде мусора.

Анализ многолетних наблюдений гидрологических показателей указывает, что максимальная концентрация донных и поверхностных наносов приходится на весенне-летний период, совпадающий с интенсивным таянием ледников и снегов, сезонными паводками. Создание эмпирических моделей эрозии SWAT и RUSLE показало, что предложенный комплекс сооружений обеспечивает снижение концентрации взвешенных наносов в очищенной воде на 23%. Экономический аспект работы указывает, что переработка извлеченных взвешенных наносов в виде ила и песка могут обеспечить дополнительным сырьем для горного дела при разработке полезных природных ископаемых. Внедрение комплекса гидротехнических сооружений с горной промышленностью способствует уменьшению заилению водохранилищ и ирригационных каналов, улучшает качество и количество водного объема, а также уменьшает нагрузку на системы. Все материалы и результаты научной работы подтверждают эффективность предложенного комплекса системы гидротехнических сооружений в совокупности с горной промышленностью как с инженерной, так и с экономической точки зрения.

Заключение

Результатом проведенных работ подтверждается эффективность предлагаемого нетрадиционного комплекса системы гидротехнических сооружений для очистки стока реки от наносов и их дальнейшего использования в горной промышленности. Новизна исследования заключается в комплексном использовании гидротехнической и горной отрасли, результат которого позволяет рационально использовать природные ресурсы (водных масс и полезных ископаемых). Строительство данного комплекса обеспечит бесперебойно и энергетически эффективно эксплуатировать насосные станции, являющиеся неотъемлемой частью ирригационных систем. Уменьшить абразивное воздействие на рабочие элементы оборудования, что в свою очередь уменьшает механические потери и повышает коэффициент полезного действия насосных агрегатов. Это прямо пропорционально снижению электроэнергии при работе. Все перечисленные моменты напрямую отражаются на экономической стороне эксплуатации всей энергосистемы страны. Очищенная вода обеспечит стабильный гидравлический режим, уменьшит риск аварийных остановок или ремонтных работ и способствует оптимизации графика работы насосных станций. Возникают условия для рационального использования энергетических ресурсов в ирригационной и горной инфраструктуре.

Уменьшение концентрации взвешенных частиц и мутности воды в качестве наносов на 23% указывает на высокую надежность предлагаемого комплекса сооружений. Способность системы функционировать в условиях сезонных колебаний свидетельствует еще об одном положительном результате работы. Как указано выше, сравнение с аналогичными исследованиями показывает, что традиционные методы очистки обеспечивают лишь частичное или временное удаление наносов и не предусматривают их дальнейшего применения. Предложенный нетрадиционный комплекс гидротехнических сооружений в отличие от этого создает возможность ресурсосбережения. Это

соответствует современным тенденциям устойчивого водопользования в условиях изменения климата. Как известно, в настоящее время существует необходимость интеграции очистных сооружений с промышленными технологиями переработки сырья в бассейнах рек Центральной Азии. Однако практические решения в данном направлении считаются ограниченными.

Интегрированное применение современных инструментов математического моделирования и прогнозирования позволяет целесообразно проектировать меры по предотвращению эрозионных процессов. В свою очередь создание расчетно-аналитических моделей SWAT и RUSLE позволяет прогнозировать эффективность очистки стока к различным гидрологическим сценариям в условиях изменения климата. Данная разработка расширяет возможности применения и воплощения в жизнь результатов. Обоснованный подход для поиска решения очистки наносов снижает нагрузку на окружающую среду и формирует дополнительный ресурсный поток для промышленности. Из всего этого следует, что результат исследовательской работы усиливает практическую значимость.

Рецензент: Носиров Н.К. — д.т.н., проф. главный научный сотрудник Института водных проблем, гидроэнергетики и экологии НАН Таджикистана

Литература

1. Аламанов, С. Изменение климата и водные проблемы в Центральной Азии / С. Аламанов, В. М. Лелевкин, О. А. Подрезов, А. О. Подрезов; Программа ООН по окружающей среде (ЮНЕП), Всемирный фонд дикой природы (WWF). – Москва/Бишкек: ЮНЕП, WWF, 2006. – С. 104–108.
2. Любимцева, Э. Изменение климата и окружающей среды в засушливой Центральной Азии: последствия, уязвимость и адаптации / Э. Любимцева, Г. М. Хенебри // Journal of Arid Environments. – 2009. – Т. 73. – С. 963–977. – DOI: 10.1016/j.jaridenv.2009.04.022.
3. Хохлов, А. В. Removal of Solid Sediments at Pumping and Hydroelectric Power Stations by Jet Pumps / А. В. Хохлов, В. А. Хохлов, Ю. О. Титова, Н. В. Хохлов // Power Technology and Engineering. – 2024. – Т. 57. – С. 719–723. – DOI: 10.1007/s10749-024-01725-x.
4. Абдураимов, М. Ф. Problemy Zarafshanskogo gidrograficheskogo basseyna [Проблемы Зарафшанского гидрографического бассейна] / М. Ф. Абдураимов. – ННО «Защита бассейна реки Зарафшан», 2017. – 120 с.
5. Шорохов, С. М. Технология и комплексная механизация разработки россыпных месторождений / С. М. Шорохов. – М.: Недра, 1973. – С. 124–134.
6. Шорохов, С. М. Разработка россыпей / С. М. Шорохов. – М.: Металлургиздат, 1948. – С. 81–87.
7. Ghimire, S. Spatial Sediment Erosion and Yield Using RUSLE Coupled with Distributed SDR Model / S. Ghimire, U. Singh, S. Adhikari, P. Bhattarai // Water. – 2024. – Vol. 16, No. 24. – P. 3549. – DOI: 10.3390/w16243549.
8. Juliev, M. A Comprehensive Review of Soil Erosion Research in Central Asian Countries (1993–2022) Based on the Scopus Database / M. Juliev, M. Kholmurodova, B. Abdikairov, J. Abuduwaili // Soil and Water Research. – 2024. – Vol. 19, No. 4. – Pp. 244–256. – DOI: 10.17221/82/2024-SWR.
9. Dou, X. Risk Assessment of Soil Erosion in Central Asia Under Global Warming / X. Dou, X. Ma, C. Zhao, J. Li, Y. Yan, J. Zhu // CATENA. – 2022. – Vol. 212. – Art. 106056. – DOI: 10.1016/j.catena.2022.106056.
10. Influencing Factors and Prediction of Turbine Sediment Abrasion in Pumped-Storage Power Stations // Energies. – 2023. – Vol. 16, No. 12. – MDPI.
11. Евдокимова, И. М. Плотины из армированного грунта / И. М. Евдокимова, Е. Б. Фонсов, Б. Х. Хамдамов // Натурные и лабораторные исследования гидротехнических сооружений. – М.: МГМИ, 1987. – С. 76–81.
12. Патент Российской Федерации № 2518634. Устройство для регулирования русловых процессов: E02B9/04 / 2014.

Reference

1. Alamanov, S. Climate Change and Water Problems in Central Asia / S. Alamanov, V. M. Lelevkin, O. A. Podrezov, A. O. Podrezov; United Nations Environment Programme (UNEP), World Wildlife Fund (WWF). – Moscow/Bishkek: UNEP, WWF, 2006. – Pp. 104–108.
2. Lyubimtseva, E. Climate and Environmental Change in Arid Central Asia: Impacts, Vulnerability, and Adaptation / E. Lyubimtseva, G. M. Henebry // Journal of Arid Environments. – 2009. – Vol. 73. – Pp. 963–977. – DOI: 10.1016/j.jaridenv.2009.04.022.
3. Khokhlov, A. V. Removal of Solid Sediments at Pumping and Hydroelectric Power Stations by Jet Pumps / A. V. Khokhlov, V. A. Khokhlov, Yu. O. Titova, N. V. Khokhlov // Power Technology and Engineering. – 2024. – Vol. 57. – Pp. 719–723. – DOI: 10.1007/s10749-024-01725-x.

4. Abduraimov, M. F. Problemy Zarafshanskogo gidrograficheskogo basseyna [Problems of the Zarafshan Hydrographic Basin] / M. F. Abduraimov. - NGO "Protection of the Zarafshan River Basin", 2017. - 120 p.
5. Shorokhov, S. M. Technology and integrated mechanization of placer deposit development / S. M. Shorokhov. - Moscow: Nedra, 1973. - Pp. 124-134.
6. Shorokhov, S. M. Placer development / S. M. Shorokhov. - Moscow: Metallurgizdat, 1948. - Pp. 81-87.
7. Ghimire, S. Spatial Sediment Erosion and Yield Using RUSLE Coupled with Distributed SDR Model / S. Ghimire, U. Singh, S. Adhikari, P. Bhattarai // Water. - 2024. - Vol. 16, No. 24. - P. 3549. - DOI: 10.3390/w16243549.
8. Juliev, M. A Comprehensive Review of Soil Erosion Research in Central Asian Countries (1993–2022) Based on the Scopus Database / M. Juliev, M. Kholmurodova, B. Abdikairov, J. Abuduwaili // Soil and Water Research. – 2024. – Vol. 19, No. 4. – Pp. 244–256. – DOI: 10.17221/82/2024-SWR.
9. Dou, X. Risk Assessment of Soil Erosion in Central Asia Under Global Warming / X. Dou, X. Ma, C. Zhao, J. Li, Y. Yan, J. Zhu // CATENA. – 2022. – Vol. 212. – Art. 106056. – DOI: 10.1016/j.catena.2022.106056.
10. Influencing Factors and Prediction of Turbine Sediment Abrasion in Pumped-Storage Power Stations // Energies. – 2023. – Vol. 16, No. 12. – MDPI.
11. Evdokimova, I. M. Reinforced Soil Dams / I. M. Evdokimova, E. B. Fonsov, B. Kh. Khamdamov // Field and Laboratory Studies of Hydraulic Structures. – Moscow: MGMI, 1987. – Pp. 76–81.
12. Patent of the Russian Federation No. 2518634. Device for regulating channel processes: E02B9/04 / 2014.

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ - МАЪЛУМОТ ДАР БОРАИ МУАЛЛИФОН- INFORMATION ABOUT AUTHORS

TJ	RU	EN
Иноятова Комола Лавзаровна	Иноятова Комола Лавзаровна	Inoyatova Komola Lavzarovna
докторанты PhD Института массалаҳои об, гидроэнергетика ва экология Академияи миллии илмҳои Тоҷикистон	докторант PhD Института водных проблем, гидроэнергетики и экологии НАН Таджикистана	PhD student at the Institute of Water Problems, Hydropower and Ecology of the National Academy of Sciences of Tajikistan
Института массалаҳои об, гидроэнергетика ва экология Академияи миллии илмҳои Тоҷикистон	Институт водных проблем, гидроэнергетики и экологии НАН Таджикистана	Institute of Water Problems, Hydropower and Ecology of the National Academy of Sciences of Tajikistan
E-mail: kamola.ikl@gmail.com		
Orcid: https://orcid.org/0009-0002-9178-0825		
TJ	RU	EN
Гулаҳмадзода Аминҷон Абдучаббор	Гулаҳмадзода Аминҷон Абдуджаббор	Gulakhmadzoda Aminjon Abdujabbor
доктори илмҳои техникӣ директор Института массалаҳои об, гидроэнергетика ва экология Академияи миллии илмҳои Тоҷикистон	доктор технических наук, директор Института водных проблем, гидроэнергетики и экологии НАН Таджикистана	Doctor of Technical Sciences Director at the Institute of Water Problems, Hydropower and Ecology of the National Academy of Sciences of Tajikistan
Института массалаҳои об, гидроэнергетика ва экология Академияи миллии илмҳои Тоҷикистон	Институт водных проблем, гидроэнергетики и экологии НАН Таджикистана	Institute of Water Problems, Hydropower and Ecology of the National Academy of Sciences of Tajikistan
E-mail: agulakhmadov@gmail.com		
Orcid: https://orcid.org/0000-0002-7289-8310		

ИНТЕГРАЦИЯ СОЛНЕЧНЫХ ЭЛЕКТРОСТАНЦИЙ В СИСТЕМУ ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЯ БАЗОВЫХ СТАНЦИЙ СОТОВЫХ ОПЕРАТОРОВ: СОВРЕМЕННОЕ СОСТОЯНИЕ И ПЕРСПЕКТИВЫ

Дж.Х. Худжасаидов

Таджикский технический университет имени академика М.С. Осими, г. Душанбе, Республика Таджикистан

Данная работа посвящена вопросам обеспечения энергоэффективности инфраструктуры сотовой связи в Республике Таджикистан. Учитывая сложный горный рельеф, перебои с центральным электроснабжением и высокий уровень солнечной инсоляции, автор проводит системный анализ возможностей внедрения солнечных электрических станций (СЭС) в гибридные схемы питания базовых станций. В статье приведен анализ эффективности комбинирования солнечных панелей, систем накопления энергии и дизель-генераторов как наиболее устойчивого решения для высокогорных регионов с сезонными колебаниями выработки энергии. Разработаны критерии оценки надежности и методика территориального зонирования для выбора оптимальных конфигураций. Приведены рекомендации по улучшению интеграционных процессов.

Ключевые слова: солнечная электростанция, телекоммуникационная инфраструктура, гибридная система электроснабжения, базовые станции, горные районы, система накопления энергии, дизельный генератор

ҲАМГИРОИИ ИСТГОҶҲОИ БАРҚИ ОҒТОБӢ БА СИСТЕМАИ ТАЪМИНОТИ БАРҚИ ИСТГОҶҲОИ ОПЕРАТОРОНИ АЛОҚАИ МОБИЛӢ: ВАЗӢИ КУНУНӢ ВА ДУРНАМО

Ҷ.Х. Хуҷасаидов

Донишгоҳи техникии Тоҷикистон ба номи академик М.С. Осимӣ, ш. Душанбе, Ҷумҳурии Тоҷикистон

Мақола ба масъалаҳои баланд бардоштани самаранокии энергетикӣ инфрасохтори шабакаҳои алоқа мобилӣ дар Ҷумҳурии Тоҷикистон бахшида шудааст. Бо назардошти релефи мураккаби қӯҳӣ, норасоии мавсимии таъминоти барқ ва сатҳи баланди шуоъпартоии офтоб(инсолятсия). Муаллифон таҳлили системавии имкониятҳои татбиқи нерӯгоҳҳои барқи офтобӣ (НБОФ) дар схемаҳои гибридии электротавминкунии истгоҳҳои асосӣ (БС) анҷом додааст. Инчунин, самаранокии таркибии панелҳои офтобӣ, системаҳои захиракунии энергия ва генераторҳои дизелӣ ҳамчун ҳалли устувор барои минтақаҳои баландқӯҳ, бо назардошти норасоии мавсимии таъминоти барқ, таҳлил карда шудааст. Инчунин, меъёрҳои баҳодиҳии эътимоднокии ва усули минтақабандии қаламрав барои интихоби конфигуратсияҳои оптималӣ таҳия шудаанд. Таъсияҳо оид ба беҳтар кардани равандҳои интегратсия пешниҳод карда шудаанд.

Калидвожаҳо: нерӯгоҳи барқи офтобӣ, инфрасохтори телекоммуникатсионӣ, системаи гибридии таъминоти барқ, истгоҳҳои асосӣ, минтақаҳои қӯҳӣ, системаи нигоҳдории энергия, генератори дизелӣ.

INTEGRATION OF SOLAR POWER PLANTS INTO THE POWER SUPPLY SYSTEM OF BASE STATIONS OF CELLULAR OPERATORS: CURRENT STATE AND PROSPECTS

J. Khujasavidov

Tajik Technical University named after Academician M.S. Osimi, Dushanbe, Republic of Tajikistan

This study focuses on ensuring the energy efficiency of cellular infrastructure in the Republic of Tajikistan. Given the complex mountainous terrain, frequent disruptions in central power supply, and high levels of solar insolation, the authors conduct a systematic analysis of the integration of solar power plants (SPP) into hybrid power supply schemes for base stations. The article presents an efficiency analysis of combining solar panels, energy storage systems, and diesel generators as the most robust solution for high-altitude regions characterized by seasonal fluctuations in energy generation. Reliability assessment criteria and a methodology for territorial zoning have been developed to facilitate the selection of optimal configurations. Recommendations for improving integration processes are provided.

Keywords: Solar power plant, telecommunications infrastructure, hybrid power supply system, base stations, mountainous regions, energy storage system, diesel generator

Введение

Сектор телекоммуникаций Республики Таджикистан демонстрирует устойчивую положительную динамику: по итогам 2024 г. совокупные доходы отрасли увеличились на 11,3%, а число активных пользователей сети Интернет превысило 4,5 млн человек. Однако расширение покрытия и повышение качества услуг сдерживается нестабильностью централизованного электроснабжения. Горный рельеф и ярко выраженная сезонность выработки гидроэлектроэнергии приводят к систематическим сезонным отключениям, частота и длительность которых препятствует улучшению качества связи. Сотовые операторы вынуждены обеспечивать автономное питание базовых станций (БС), традиционно используя дизель-генераторные агрегаты (ДГА) совместно с аккумуляторными батареями. Данная схема обладает рядом недостатков:

- высокая стоимость дизельного топлива, особенно в удалённых районах (транспортная составляющая увеличивает цену в 2–3 раза относительно базовой);
- необходимость организации сложной логистики горюче-смазочных материалов, ограниченный моторесурс ДГА;
- значительные выбросы парниковых газов.

Альтернативой выступают фотоэлектрические системы (ФЭС), потенциал которых в условиях Таджикистана оценивается как высокий. Среднегодовое значение суммарной солнечной радиации на горизонтальную поверхность составляет 1400–1800 кВт·ч/м², число солнечных дней в году достигает 250–300. [1-2].

Работа посвящена оценке целесообразности использования СЭС для гибридного электроснабжения объектов сотовой связи. Анализ проводится с учетом специфики горного рельефа, климата, инфраструктуры и и регуляторных условий.

1. Системные предпосылки и нормативный контекст внедрения ФЭС

1.1. Структурные ограничения централизованного энергоснабжения

Энергосистема Таджикистана базируется преимущественно на гидрогенерации (свыше 95% установленной мощности). В летний период наблюдается избыток генерированных мощностей, а в зимний — при снижении стока рек и увеличении потребления возникает дефицит, сопровождающийся веерными отключениями.

Для телекоммуникационных объектов, особенно расположенных в сельской местности и горных районах, длительность перерывов в электроснабжении может достигать несколько часов в сутки. При этом требования к безотказности питания оборудования связи регламентируются нормативными документами: допустимое время перерыва не должно превышать времени автоматического включения резерва (как правило, не более 10–15 минут). Традиционная схема электроснабжения на базе дизель-генераторных агрегатов (ДГА) и аккумуляторных батарей (АКБ) не всегда гарантирует выполнение требуемых показателей надежности. Это обусловлено рядом факторов:

- физический износ оборудования;
- дефицит генерирующих мощностей ДГА вследствие модернизации объектов и роста нагрузок;
- сложности со своевременной доставкой топлива в горные районы из-за сезонно-климатических ограничений;
- ограниченная емкость аккумуляторных батарей.

1.2. Государственное регулирование и стимулирование потребительского спроса.

В рамках Парижского климатического соглашения (2015 г.), являющегося фундаментальным международным договором по ограничению последствий глобального потепления, Таджикистан активно реализует свой национальный климатический план. Страна фокусируется на сдерживании антропогенных выбросов парниковых газов, используя комплексный подход, включающий энергоэффективность и внедрение возобновляемых источников энергии.

2. Технические аспекты использования СЭС в горных условиях Таджикистана

2.1. Влияние высотного фактора на эффективность фотоэлектрических модулей

Размещение базовых станций на абсолютных высотах 1500–3500 м над уровнем моря накладывает особые требования к проектированию. С повышением высоты наблюдается:

- увеличение интенсивности суммарной солнечной радиации (на 10–15% на каждые 1000 м за счёт уменьшения толщины атмосферы);
- снижение средней температуры воздуха (в среднем на 0,6°C на 100 м), что положительно сказывается на КПД фотоэлектрических модулей (температурный коэффициент мощности большинства панелей составляет –0,3...–0,4%/°C);

- рост уровня ультрафиолетового излучения, ускоряющего деградацию полимерных материалов защитного покрытия (требуется использование панелей с наилучшими показателями эффективности и минимальным уровнем деградации);

- вероятные снеговые нагрузки и обледенение, требующие увеличения угла наклона панелей ($40\text{--}50^\circ$ от горизонтали) и применения антиобледенительных покрытий или систем автоматической очистки.

Эксплуатация существующих объектов на базе ФЭС подтвердила, что годовая удельная выработка на высоте 3000 м может превышать расчётную для равнинных условий на 18–22% при условии корректного выбора угла установки и регулярного удаления снежного покрова.

2.2. Логистические ограничения и модульный принцип

Многие объекты располагаются в труднодоступных районах, где транспортная инфраструктура отсутствует, либо становится непроходимой из-за климатических особенностей в определенные сезоны. Доставка тяжёлых и крупногабаритных компонентов (аккумуляторные батареи, опорные конструкции, инверторы) возможна с использованием выючного транспорта (лошади, ослы), что многократно увеличивает капитальные затраты. В ответ на это целесообразно применение модульных топологий ФЭС:

- разбивка солнечного поля на функциональные блоки мощностью 1–3 кВт каждый;
- использование литий-железо-фосфатных (LiFePO_4) аккумуляторов с высокой удельной энергоёмкостью (120–150 Вт·ч/кг) и ресурсом не менее 5000 циклов, что снижает массу системы накопления энергии в 2–3 раза по сравнению со свинцово-кислотными аналогами;
- применение складных или рулонных фотоэлектрических панелей на полимерной основе.

2.3. Оптимальная топология гибридной энергосистемы

Поскольку солнечное излучение имеет стохастичный характер (суточная и сезонная вариация), для обеспечения заданного уровня надёжности, наиболее оптимальной является трёхкомпонентная гибридная конфигурация «ФЭС + СНЭ + ДГА» с интеллектуальным контроллером управления потоками энергии (Energy Management System, EMS).

Функциональное распределение следующее:

- ФЭС — источник базовой мощности в дневное время. Приоритет отдачи нагрузки и заряда системы накопления энергии (СНЭ).
- СНЭ — обеспечивает питание в ночное время, в периоды облачности и кратковременные пики нагрузки. Глубина разряда ограничена до 20–30% для продления ресурса.
- ДГА — выступает в роли страховочного резерва: запускается при снижении уровня заряда СНЭ ниже порогового (обычно 20–30% номинальной ёмкости) и при прогнозируемой продолжительности неблагоприятных погодных условий более 48 часов.

Интеллектуальный алгоритм управления использует краткосрочный прогноз инсоляции (на основе спутниковых данных) и нагрузки на БС для оптимизации режимов. По расчётам, такая конфигурация позволяет сократить долю дизельной генерации с 100% до 15–25% от общего энергобаланса в среднегорье и до 5–10% — в высокогорье с устойчивой инсоляцией.

3. Моделирование энергетического баланса и методика зонирования

3.1. Параметрическая модель оценки

Для принятия обоснованных решений о целесообразности интеграции ФЭС на конкретном объекте предлагается использовать параметрическую модель энергобаланса. Входные переменные включают:

- среднесуточное потребление базовой станции, P_{load} , кВт·ч/сут;
- инсоляционный потенциал региона (Таджикистан), I , - 4,5 до 5 кВт·ч/м²/сут;
- коэффициент полезного действия ФЭС с учётом потерь в инверторе, кабелях и загрязнения панелей, $\eta_{sys} = (0,75 - 0,85)$;

• требуемый уровень резервирования, R (доля времени, когда система должна работать без ДГА, обычно 0,90–0,99);

• ёмкость системы накопления, E_{batt} , кВт·ч.

Уравнение энергетического баланса в установившемся режиме (усреднение по месяцам):

$$E_{\text{ФЭС}} = \frac{P_{\text{load}} \cdot 24}{R} - E_{\text{разряд}} + E_{\text{заряд}};$$

где $E_{\text{ФЭС}}$ — суточная выработка от ФЭС, которая не может превышать $I \cdot S_{\text{панелей}} \cdot \eta_{\text{sys}}$,

$S_{\text{панелей}}$ — общая площадь модулей.

Решая обратную задачу, для каждого географического узла можно определить минимально необходимую мощность ФЭС и ёмкость СНЭ, при которых ДГА будет включаться не чаще заданного порога (например, не более 5% времени).

В табл. 2., приведены результаты определения оптимальной конфигурации системы электроснабжения базовой станции со среднесуточной нагрузкой 3,5 кВт.

Таблица 2 – Оптимальная конфигурация системы электроснабжения базовых станций

Table 2 – Optimal configuration of the base station power supply system

Компонент	Количество/мощность	Параметры	Примечание
Солнечные панели	14шт/7,7 кВт	Класс А	единичная мощность 550Вт
Аккумуляторные батареи	6 шт/30,7 кВт·ч	LiFePO_4 , 51,2В, 100А·ч	единичная ёмкость 100А·ч
Гибридный инвертор	1 шт. /(8 кВт с автозапуском ДГ)	Ток заряда от инвертора не менее 100А	для зарядки АКБ за 4-5 часов
Дизельный генератор	1 шт.	8 кВт	

Примечание:

Эта конфигурация обеспечит:

- В солнечный зимний день – до 80% энергии от солнца (40–45 кВт·ч), АКБ зарядится полностью, ДГА не запустится или будет работать 1–2 часа.
- В пасмурный зимний день – ДГА работает ~2-3 часа, потребляя ~7-10 л дизельного топлива.
- Летом – полная автономность, избыток энергии можно отдавать в сеть.
-

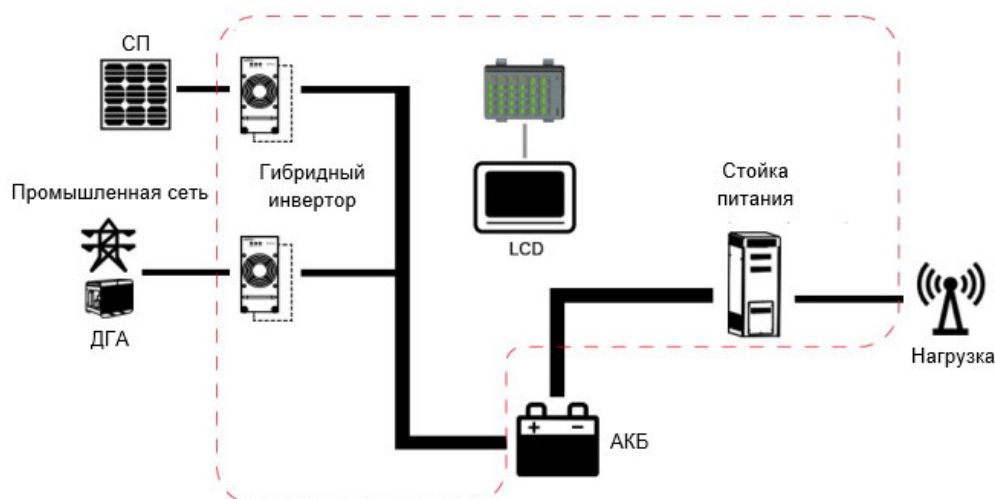


Рисунок 1 – Конфигурация системы электроснабжения на базе гибридных СЭС

Figure 1 – Configuration of the power supply system based on hybrid SPPs

Результаты расчета выработки электроэнергии в суточном разрезе для электроснабжения БС с конфигурацией «СЭС+АКБ+ДГА» для летнего периода приведены в табл.3.

Таблица 3 – Суточный режим работы гибридной СЭС

Table 3 – Daily operating profile of the hybrid SPP

Часы	Выработка кВт·ч	Нагрузка	Состояние АКБ	Режим ДГА
0-6	0	2,5	Разряд с 77% до 30%	выкл
6-9	3	1,8-2,5	Заряд с 30% до 60%	выкл
9-12	12,8	3,2	Заряд с 60% до 80%	выкл
12-15	21,8	2,8	100% заряжен	выкл
15-18	18	2	100% заряжен	выкл
18-21	6	3,5	100% заряжен	выкл
21-24	0	3,5	Разряд с 100% до 68%	выкл

3.2. Зонирование территории Таджикистана по типам энергосхем

Согласно [1, 2, 4, 5] и карт транспортной доступности выделены три зоны:

- Зона А — равнинная и предгорная (до 1200 м): стабильная инсоляция, относительная близость к централизованным сетям. Рекомендована схема «ФЭС + СНЭ» без ДГА с возможностью подзарядки от сети. Требуемая автономия — 1–2 суток.

- Зона В — среднегорье (1200–2500 м): инсоляция повышенная, но сеть нестабильна или отсутствует. Обязательна трёхкомпонентная схема «ФЭС + СНЭ + ДГА» с расчётной автономией по СНЭ не менее 3 суток. Доля участия ДГА — до 20% годового баланса.

- Зона С — высокогорье (>2500 м), включая перевалы, ГБАО: инсоляция максимальная, однако суровые погодные условия и длительные периоды снегопадов. Схема «ФЭС + СНЭ + ДГА» с увеличенной ёмкостью СНЭ (5–7 суток) и дополнительным подогревом аккумуляторного отсека.

Моделирование для типовой БС в зоне В показывает, что оптимальная мощность ФЭС лежит в диапазоне 3–5 кВт_р (киловатт пиковых) при ёмкости СНЭ 15–25 кВт·ч. ДГА мощностью 8-10 кВт используется менее 200 часов в год, что снижает затраты на его обслуживание и продлевает ресурс.

4. Экономическая эффективность: от капитальных затрат к совокупной стоимости владения

4.1. Структура затрат по этапам жизненного цикла

Оценка экономической эффективности ФЭС в телекоммуникационном секторе традиционно производится с помощью показателя совокупной стоимости владения (Total Cost of Ownership, TCO) на горизонте 10–15 лет. В расчёт включаются:

- Капитальные затраты: приобретение фотоэлектрических модулей, инверторов, контроллеров, СНЭ, опорных конструкций, а также монтаж и логистика.

- Эксплуатационные затраты (ОРЕХ): замена компонентов с ограниченным ресурсом (аккумуляторы, инверторы), периодическое техническое обслуживание (очистка панелей, контроль соединений), расходы на топливо (для ДГА) и его доставку, заработная плата персонала.

Сравнительный анализ для типичной БС со среднесуточной мощностью 3,5 кВт в удалённом районе на высоте 2000 м приведен в табл.1.

Таблица 1 – Техничко-экономические показатели

Table 1 – Technical and economic indicators

Параметр	Традиционная схема (ДГА+АКБ)	Гибридная схема (ФЭС+АКБ+ДГА)
Капитальные затраты, тыс. \$	12-15	25-30
Ежегодные эксплуатационные затраты, тыс. \$	13-17	1,5–2,5
ТСО за 10 лет, тыс. \$	68–102	33–50
Сокращение расхода дизеля, л/год	–	(70–80%)
Срок окупаемости, лет	–	4-6

Данные таблицы демонстрируют, что более высокий начальный CAPEX гибридной системы компенсируется резким снижением OPEX, главным образом за счёт уменьшения потребления и доставки дизельного топлива. Чувствительность TCO к цене топлива: при росте стоимости 1 литра на 20% срок окупаемости снижается на 0,7–1,2 года.

4.2. Неценовые экономические эффекты

Помимо прямых денежных потоков, интеграция ФЭС создаёт следующие количественно оцениваемые выгоды:

- Снижение простоев и упущенной выручки. Уменьшение числа отказов электроснабжения на 80–90% приводит к росту коэффициента доступности услуг с 0,95 до 0,998, измеряемого по формуле:

$$A = \frac{MTBF}{(MTBF + MTTR)};$$

где:

A (Availability) — коэффициент готовности (безразмерная величина от 0 до 1 или проценты).

MTBF (Mean Time Between Failures) — среднее время между отказами (чем больше, тем надёжнее).

MTTR (Mean Time To Repair) — среднее время восстановления (чем меньше, тем быстрее чинится).

- Увеличение срока службы аккумуляторов. Интеллектуальное управление гибридной системой продлевает ресурс СНЭ на 20–30% за счёт оптимизации глубины и частоты разрядов (до 5000–6000 циклов для LiFePO₄ против 1000–1500 для свинцово-кислотных в аварийных режимах).

- Снижение логистических рисков. Уменьшение частоты рейсов по доставке топлива снижает вероятность аварий и простоев, связанных с отсутствием ГСМ в период природных препятствий для транспорта.

5. Надёжность и живучесть гибридных энергосистем

Интеграция ФЭС не должна снижать показатели безотказности электроснабжения по сравнению с традиционной схемой. Для количественной оценки введён коэффициент сохранения нагрузки (Loss of Load Probability, LOLP). Расчётная оценка для традиционной схемы «ДГА+АКБ» в условиях Таджикистана составляет 0,05–0,10 (т.е. 5–10% времени возможен дефицит мощности). Для гибридной схемы с EMS и прогнозированием LOLP может быть снижен до 0,01–0,02, что соответствует мировым стандартам для телекоммуникаций (класс надёжности 2,5 «девятка» — 99,5%).

Способность сохранять частичную работоспособность при множественных отказах — обеспечивается за счёт:

- резервирования;
- секционирования СНЭ на параллельные банки (при отказе одной секции остальные продолжают работу);
- возможности ручного приоритетного управления ДГА на время проведения ремонтных работ на ФЭС.

В высокогорных зонах рекомендуется установка дистанционного перезапуска, что позволяет избежать выезда бригады в сложных погодных условиях.

7. Практические рекомендации по реализации проектов интеграции ФЭС

На основе системного анализа формулируются следующие рекомендации:

1. Приоритетное применение гибридных топологий. Отказ от ДГА полностью оправдан только в зоне А (равнины с устойчивой сетью) и для маломощных ретрансляторов (< 500 Вт). Во всех остальных случаях обязательна схема «ФЭС + СНЭ + ДГА».

2. Стандартизация проектных решений. Готовые решения для солнечных станций разной мощности (от 1 до 10кВт) с одинаковыми способами подключения ускорят проектирование и снизят количество ошибок при сборке.

3. Обязательный учёт региональных климатических данных. Использование помесячных значений инсоляции за последние 10-лет. Зимний дефицит компенсируется либо увеличением емкости аккумуляторных батарей, либо долей ДГА.

4. Внедрение удалённого мониторинга и прогнозной аналитики. Необходимо наладить удаленный контроль и прогнозную аналитику. Организовать систему мониторинга, которая в реальном времени отслеживает ток, напряжение, температуру батарей и уровень топлива, отправляя данные на сервер. Использовать алгоритмы машинного обучения для прогноза выработки энергии и оптимизации работы дизель-генератора.

5. Создание региональных сервисных центров с запасом критических компонентов (инверторы, контроллеры, модули BMS) в региональных центрах для сокращения времени восстановления при отказах.

6. Программы обучения технического персонала. Разрабатываются программы обучения технического персонала, включающие следующие разделы: безопасная работа с высоковольтными цепями фотоэлектрических станций, диагностика LiFePO₄ аккумуляторов, настройка EMS, а также специфика очистки панелей в горных условиях.

Заключение

Использование солнечных электростанций в качестве альтернативного источника для электроснабжения базовых станций мобильной связи в Таджикистане — это не просто обновление оборудования, а важный шаг к энергетической независимости. Такой подход позволяет мобильным операторам серьезно экономить деньги и меньше зависеть от доставки дизельного топлива в труднодоступные места. Эти изменения напрямую поддерживают государственный план — «Стратегию развития зелёной экономики до 2037 года», утвержденный правительством. Модернизация энергоснабжения в сфере связи — это часть общей цели страны. Переход на экологически чистую энергию помогает не только решать технические задачи, но и развивать экономику, беречь природу и улучшать жизнь людей, делая связь более доступной. Проще говоря, оснащение базовых станций солнечными панелями — это реальный и практичный способ построить устойчивое и экологичное будущее, как и задумано в национальной стратегии.

Рецензент: Джураев Ш.Дж. — к.т.н., доцент кафедры Электроэнергетики, филиала ННУ «МЭИ» в г. Душанбе

Литература

1. Шохзода, Б. Т. Исследование потенциала солнечной энергии в Таджикистане / Б. Т. Шохзода, Ш. Дж. Джураев // Политехнический вестник. Серия: Инженерные исследования. – 2018. – № 3(43). – С. 20–25.
2. Киргизов, А. К. Влияние местности на определение потенциала возобновляемых источников энергии / А. К. Киргизов, З. С. Ганиев, Р. А. Джалилов // Политехнический вестник. Серия: Инженерные исследования. – 2018. – № 1(41). – С. 34–46.
3. Худжасаидов, Дж. Х. Разработка имитационной модели централизованного обслуживания распределённой генерации / Дж. Х. Худжасаидов // Политехнический вестник. Серия: Инженерные исследования. – 2024. – № 2(66). – С. 39–46.
4. Solar Market Research and Analysis [Электронный ресурс]. – URL: <http://www.solarbuzz.com/facts-and-figures/retail-price-environment/module-prices>.
5. Sharifov, B. N. Electromagnetic Transients in the Control System of Output Parameters of a Solar Power Plant in the Tajikistan Central Asia Region / B. N. Sharifov, M. Kh. Safaraliev [et al.] // International Journal of Hydrogen Energy. – 2022. – Vol. 47, Iss. 9. – Pp. 5757–5765.

Reference

1. Shokhzoda, B. T. Study of Solar Energy Potential in Tajikistan / B. T. Shokhzoda, Sh. Dzh. Juraev // Polytechnic Bulletin. Series: Engineering Research. - 2018. - No. 3 (43). - P. 20-25.
2. Kirgizov, A. K. Influence of Terrain on Determining the Potential of Renewable Energy Sources / A. K. Kirgizov, Z. S. Ganiev, R. A. Dzhaliylov // Polytechnic Bulletin. Series: Engineering Research. - 2018. - No. 1 (41). - P. 34-46.

3. Khujasaidov, J. H. Development of a Simulation Model for Centralized Maintenance of Distributed Generation / J. H. Khujasaidov // Polytechnic Bulletin. Series: Engineering Research. - 2024. - No. 2 (66). – P. 39–46.
4. Solar Market Research and Analysis [Electronic resource]. – URL: <http://www.solarbuzz.com/facts-and-figures/retail-price-environment/module-prices>.
5. Sharifov, B. N. Electromagnetic Transients in the Control System of Output Parameters of a Solar Power Plant in the Tajikistan Central Asia Region / B. N. Sharifov, M. Kh. Safaraliev [et al.] // International Journal of Hydrogen Energy. – 2022. – Vol. 47, Iss. 9. – Pp. 5757–5765.

**МАЪЛУМОТ ДАР БОРАИ МУАЛЛИФ – СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРЕ –
INFORMATION ABOUT AUTHOR**

TJ	RU	EN
Хучасайдов Ҷаҳонгир Хучасайдович	Худжасайдов Джахонгир Худжасайдович	Khujasaidov Jahongir Khujasaidovich
н.и.т., дотсент	к.т.н., доцент	Ph.D., Associate Professor
ДТТ ба номи академик М.С. Осимӣ	ТТУ имени академика М.С. Осими	TTU named after academician M.S. Osimi
E-mail: jahon_nstu@mail.ru		
https://orcid.org/0000-0003-2322-5985		

МЕТАЛЛУРГИЯ ВА МАВОДШИНОСӢ - МЕТАЛЛУРГИЯ И МАТЕРИАЛОВЕДЕНИЕ - METALLURGY AND MATERIALS SCIENCE

УДК: 669÷665.64÷628.166÷544.473÷504.75

DOI: 10.65599/ENG1224

О КАТАЛИТИЧЕСКОЙ АКТИВНОСТИ ЭЛЕМЕНТОВ ПЕРИОДИЧЕСКОЙ СИСТЕМЫ

Д.И. МЕНДЕЛЕЕВА

Т.Д. Джураев, Э.Р. Газизова, М.А. Иззатуллоев

Таджикский технический университет имени академика М.С. Осими, г. Душанбе, Республика Таджикистан

В данной статье приведены результаты прогноза каталитической активности химических элементов на основании применения положений периодического закона Д.И. Менделеева и кристаллохимической теории наследственности в неорганической природе. Установлено, что порядковый номер, расположение химического элемента в Периодической системе Д.И. Менделеева и наличие соответствующего генетического кода позволяют заведомо прогнозировать каталитическую активность его двойных соединений. На основании полученных результатов установлен ряд критериев, облегчающий выбор веществ-катализаторов для внедрения в различные отрасли промышленности. Это позволило авторам предложить составы более четырех тысяч соединений, которые должны проявлять каталитическую активность.

Ключевые слова: химические элементы, порядковый номер, Периодическая система Д.И. Менделеева, период, группа, подгруппа, прогноз каталитической активности, вертикальные, горизонтальные и диагональные аналогии элементов.

ОИД БА ФАӢОЛНОКИИ КАТАЛИТИКИИ ЭЛЕМЕНТӢОИ СИСТЕМАИ ДАВРИИ Д.И. МЕНДЕЛЕЕВ

Т.Ҷ. Чураев, Э.Р. Газизова, М.А. Иззатуллоев

Донишгоҳи техникии Тоҷикистон ба номи академик М.С. Осимӣ, ш. Душанбе, Ҷумҳурии Тоҷикистон

Дар мақолаи мазкур натиҷаҳои пешгӯии фаъолнокии каталитикии элементҳои химиявӣ дар асоси татбиқи қонунҳои ҷадвали даврии Д.И. Менделеев ва назарияи кристаллохимиявии ирсият дар табиати ғайриорганикӣ оварда шудаанд. Муайян гардид, ки рақами тартибӣ, ҷойгиршавии элементҳои химиявӣ дар Системаи даврии Д.И. Менделеев ва мавҷудияти коди генетикии мувофиқ имкон медиҳанд фаъолнокии каталитикии пайвастагиҳои дучандаи он пешгӯӣ карда шаванд. Дар асоси натиҷаҳои бадастомада як қатор меъёрҳо муайян карда шуданд, ки интиҳоби моддаҳои катализаторро барои татбиқ дар соҳаҳои гуногуни саноат осон мегардонанд. Ин ба муаллифони имкон дод, ки таркиби зиёда аз чор ҳазор пайвастагиро пешниҳод намоянд, ки бояд фаъолнокии каталитикӣ нишон диҳанд.

Калидвожаҳо: элементҳои химиявӣ, рақами тартибӣ, элементҳои системаи даврии Д.И. Менделеев, давр, ғурӯҳ, зерғурӯҳ, пешгӯии фаъолнокии каталитикӣ, монандиҳои амудӣ, уфуқӣ ва диагоналии элементҳо.

ON THE CATALYTIC ACTIVITY OF THE ELEMENTS OF D. I. MENDELEEV'S PERIODIC SYSTEM

T.J. Juraev, E.R. Gazizova, M.A. Izzatulloev

Tajik Technical University named after Academician M.S. Osimi, Dushanbe, Republic of Tajikistan

This article presents the results of predicting the catalytic activity of chemical elements based on the application of the principles of D. I. Mendeleev's Periodic Law and the crystal-chemical theory of heredity in inorganic nature. It has been established that the atomic number, the position of a chemical element in D. I. Mendeleev's Periodic Table, and the presence of a corresponding genetic code make it possible to predict in advance the catalytic activity of its binary compounds. Based on the obtained results, a number of criteria have been developed to facilitate the selection of catalyst substances for implementation in various branches of industry. This enabled the authors to propose the compositions of more than four thousand compounds that are expected to exhibit catalytic activity.

Keywords: chemical elements, atomic number, D. I. Mendeleev's Periodic Table, period, group, subgroup, prediction of catalytic activity, vertical, horizontal, and diagonal analogies of elements.

Введение

Распределение химических элементов в Периодической системе Д.И. Менделеева (ПС) сравнимо с математическим упорядочением множества её составляющих [1, 2], при котором каждый порядковый номер нового элемента отвечает за его важные характеристики. Они в свою очередь могут быть заведомо определены и в соединениях, образуемых им с другими элементами. Исходя из того, что порядковый номер отвечает за заряд ядра и общее число электронов элемента по атомным орбиталям, можно ориентируясь на их показания определить валентную структуру атома, позволяющую прогнозировать все физико-химические свойства его обладателя. Учитывая прямую взаимосвязь между номером и положением химического элемента в ПС с его свойствами [3, 4],

существует вероятность составить относительно полную картину о химической природе элемента и образуемых им соединений, что легло в основу периодического закона, примененного с большим успехом Д.И. Менделеевым.

Методика и результаты исследований

Теоретический фундамент для предсказания неизвестных свойств элементов и их соединений состоит в общности квантово-механических принципов электронного строения атомов (и молекул). В связи с этим актуальной становится разработка методики прогноза каталитической активности элементов ПС с использованием кристаллохимической теории наследственности (КХТН) в неорганической природе, предложенной и распространенной нами для прогноза каталитической активности и др. свойств химических веществ. Было установлено [5], что каталитическую активность проявляют как простые, так и сложные неорганические и органические химические вещества. Согласно КХТН в качестве материальных носителей информации представляются химико-структурированные единицы наследственности (ХСЕН) – гены в виде тетраэдрических (ТЭ) и октаэдрических (ОЭ) гибридных орбиталей с определённой электронной конфигурацией с четырьмя sp^3 -, sd^3 -, sp^2d - и шестью s^2p^4 -, s^2d^4 -, spd^4 -, sp^3d^2 -эквивалентными связями, углами между ними в 109.5° и 90° и координационными числами (КЧ) 4 и 6, соответственно. Они являются ближним порядком в кристалле, энергетически выгодными формами при структурообразовании и генетическим кодом наследственной информации каталитической активности веществ [5].

На основе методики прогноза каталитических свойств химических веществ разработан следующий ряд критериев, характеризующих склонность элементов к проявлению каталитической активности, которая, аналогично многим другим характеристикам, является периодическим свойством элемента, зависящем от его положения в ПС, где проявляются вертикальные, горизонтальные и диагональные аналогии:

- чистые элементы IVB (C, Si, Ge, Sn) и VIIIB (He, Ne, Ar, Kr, Xe и Rn) групп ПС, отличающиеся от других элементов своим стабильным электронным строением и кристаллизующиеся в ТЭ-кой и ОЭ-кой конфигурациях гибридных орбиталей с КЧ 4 и 6, соответственно, заведомо обладая генетическим кодом, проявляют каталитическую активность;

- чистые металлы ПС практически не проявляют каталитическую активность, так как их кристаллы не имеют генетического кода;

- чистые элементы ПС при взаимодействии с другими элементами образуют сплавы (механические смеси, твердые растворы, химические соединения и промежуточные фазы), кристаллы которых могут приобретать соответствующий генетический код и проявлять каталитическую активность;

- чистые элементы ПС, имеющие магические числа, а их атомные ядра, отличающиеся значительно более стабильной и прочной связью, чем другие ядра (например, 2-He, 8-O, 20-Ca, 28-Ni, 82-Pb) в соединениях приобретают соответствующий генетический код и проявляют каталитическую активность.

Рисунок 1 – ПТ с двумя осями [6]

Figure 1 – Two-axis periodic table [6]

Вышеупомянутые элементы IVB и VIIIB групп ПС образуют две вертикальные аналогии, одна из которых принадлежит подгруппе углерода, а другая – благородных газов. Наличие отличительных характеристик в электронном строении этих элементов стало поводом изображения ПС в виде двух «осей» (рис. 1).

В свою очередь, этот признак помогает эмпирически прогнозировать по правилу «поперечного замещения» [6] состав образования двухкомпонентных эквивалентных полновалентных четырехэлектронных соединений (ПЧЭС) между элементами, расположенными вокруг этих осей [7, 8], например, A^1B^7 (LiH, NaF, KCl, RbBr и др.), A^2B^6 (BeO, MgO, CaO, SrO и др.), A^3B^5 (BN, AlP, GaAs, InSb и др.). Образовавшиеся ПЧЭС, имитирующие характеристики элементов IVB и VIIIB групп ПТ и являющиеся их аналогами, имеют соответствующий генетический код и проявляют каталитическую активность.

Еще более удобной для рассмотрения образования подобных соединений является ПС с расположением элементов по спирали (рис. 2), в которой обе оси находятся одна над другой [6]. Справа на рисунке 2 расположены общие анионы элементов для прогнозируемых ПЧЭС. Слева находятся их катионы. Катионы, расположившиеся в верхней части рисунка, образуют соединения с ОЭ конфигурацией, а в нижней части – катионы, образующие соединения с ТЭ конфигурацией генетического кода. В результате взаимодействия оба атома соединения приобретают конфигурацию элементарных прототипов элементов VIIIB и IVB групп. Лантаниды и актиниды участвуют в образовании подобных соединений, проявляя горизонтальные аналогии. Переходные металлы (ПМ) IVA-VIIA групп не участвуют в образовании ПЧЭС. Палладий и платина, имеющие большие энергии связи и схожее с элементами VIIIB группы электронное строение, также могут быть предельными прототипами ПЧЭС [9]. Оценка количества ПЧЭС при учете только характеристичной валентности элементов ПТ составила 4555 соединений [8], которые должны проявлять каталитическую активность.

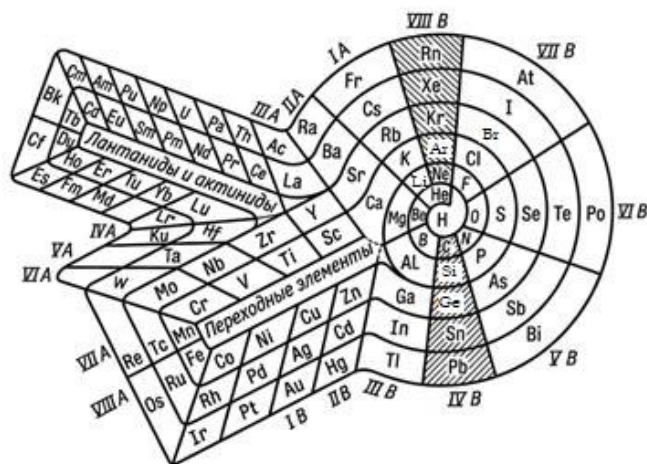


Рисунок 2 – ПС с расположением элементов по спирали [6]

Figure 2 – Substation with a spiral arrangement of elements [6]

Уникальное расположение водорода в ПС, где он занял место сразу в двух группах (IA и VIIB) и ещё в самом центре по спирали (рис. 2), указывает на его универсальные свойства быть одновременно элементарным прототипом элементов IVB и VIIIB групп, а также участником двухкомпонентных ПЧЭС как катион H^+ (галогеноводород) и как анион H^- (гидрид), катализирующий многие химические реакции. Это подтверждает тот факт, что в водных и других растворителях присутствуют гидратированные и сольватированные протоны с ТЭ и ОЭ конфигурациями гибридной орбитали с КЧ 4 и 6 в зависимости от концентрации растворителя. Проще говоря, ионы водорода H^+ и H^- тоже обладают генетическим кодом [10], поэтому они проявляют каталитическую активность.

Известно [9-11], что при комнатной температуре водород, взаимодействуя со многими металлами ПС, образует прочные тонкие пленки гидридов на их поверхностях. Оказалось, что они

проявляют каталитическую активность. При вынесении такого утверждения мы склонялись на результаты нейтронографического анализа, с помощью которого у гидридов установили [9-11] ГЦК структуру типа NaCl, обладающую ближним порядком, указывающим на наличие в них генетического кода с ОЭ конфигурацией гибридной орбитали и $KЧ = 6$. Поэтому многие каталитические процессы с участием металлических катализаторов протекают не на поверхности металла, а на поверхности прочной пленки твердого раствора или химического соединения гидрида металла.

Помимо сходства, проявляемого химическими элементами в вертикальных и горизонтальных столбцах ПС существует аналогия в свойствах элементов, расположенных на ее диагональных сечениях, которые могут образовывать химические соединения, приобретающие соответствующий генетический код и проявляющие каталитическую активность в химических реакциях. Так, ХСЕН с ТЭ конфигурацией присутствуют в сплавах систем щелочных и щелочноземельных металлов IA и IIA групп с элементами IV и III подгрупп (C, Si, Ge, Sn, B, Al, Ga, In и Tl), соответственно. В структурах NaSi, BaSi₂, KGe, KSn, Na₂Tl установлено [12] наличие ХСЕН с ТЭ конфигурацией. В двойных сплавах переходных металлов с Al, B, C, P, N, O и S могут образовываться химические соединения, например: алюминиды MeAl₃ структурного типа TiAl₃ с ТЭ кофигурацией генетического кода (КГК) ближнего порядка (табл. 1); дибориды MeB₂ типа AlB₂ с ОЭ КГК (табл. 2); монокарбиды MeC типа NaCl с ОЭ КГК (табл. 3); монофосфиды MeP типа сфалерита ZnS с ТЭ КГК и типа NaCl с ОЭ КГК; моонитриды MeN типа вюрцита ZnS с ТЭ КГК и типа NaCl с ОЭ КГК; монооксиды MeO типа NaCl с ОЭ КГК; моносulfиды MeS типа NaCl с ОЭ КГК.

Таблица 1 – Характеристики генетического кода кристаллов алюминидов, для которых прогнозируются свойства катализаторов

Table 1 – Genetic code characteristics of aluminide crystals predicted to exhibit catalytic properties

Соединение	Алюминид					
	титана	циркония	ванадия	тантала	ниобия	хрома
Химическая формула	TiAl ₃	ZrAl ₃	VAI ₃	TaAl ₃	NbAl ₃	CrAl ₃
Структурный тип (дальний порядок)	ГЦК	ГЦК	ГЦК	ГЦК	ГЦК	ГЦК
Конфигурация генетического кода (ближний порядок)	ТЭ	ТЭ	ТЭ	ТЭ	ТЭ	ТЭ
Координационное число	4	4	4	4	4	4
Тетраэдрический угол	109.5°	109.5°	109.5°	109.5°	109.5°	109.5°
Теплота образования из элементов, ΔH_{298} в Кдж/моль	146.3	–	108.68	109.51	118.71	50.16
Температура плавления, $T_{пл}$ в К	1628	1853	1633	1900	2023	1213

Таблица 2 – Характеристики генетического кода кристаллов боридов, для которых прогнозируются свойства катализаторов

Table 2 – Genetic code characteristics of boride crystals predicted to exhibit catalytic properties

Соединение	Борид						
	Al	Ti	Zr	Nb	Ta	V	Cr
Химическая формула	AlB ₂	TiB ₂	ZrB ₂	NbB ₂	TaB ₂	VB ₂	CrB ₂
Структурный тип (дальний порядок)	ПУГ	ПУГ	ПУГ	ПУГ	ПУГ	ПУГ	ПУГ
Конфигурация генетического кода (ближний порядок)	ОЭ	ОЭ	ОЭ	ОЭ	ОЭ	ОЭ	ОЭ
Координационное число	6	6	6	6	6	6	6
Октаэдрический угол	90.0°	90.0°	90.0°	90.0°	90.0°	90.0°	90.0°
Теплота образования из элементов, ΔH_{298} в Кдж/моль	–	292.6	320.6	246.62	192.28	259.16	125.4
Температура плавления, $T_{пл}$ в К	2973	3253	3473	3273	3310	2673	2473
Микротвёрдость, ГПа	–	30.0	28.0	19.0	20.0	23.0	19.0

Таблица 3 – Характеристики генетического кода кристаллов карбидов, для которых прогнозируются свойства катализаторов

Table 3 – Genetic code characteristics of carbide crystals predicted to exhibit catalytic properties

Соединение	Карбид								
	Sc	Ti	V	Zr	Nb	Mo	Hf	Ta	W
Химическая формула	ScC	TiC	VC	ZrC	NbC	MoC	HfC	TaC	WC
Структурный тип (дальний порядок)	ГЦК	ГЦК	ГЦК	ГЦК	ГЦК	ПУГ	ГЦК	ГЦК	ПУГ
Конфигурация генетического кода (ближний порядок)	ОЭ	ОЭ	ОЭ	ОЭ	ОЭ	ОЭ	ОЭ	ОЭ	ОЭ
Координационное число	6	6	6	6	6	6	6	6	6
Октаэдрический угол	90.0°	90.0°	90.0°	90.0°	90.0°	90.0°	90.0°	90.0°	90.0°
Теплота образования из элементов, ΔH_{298} в Кдж/моль	–	187.3	101.0	184.7	129.9	- 40.6	–	140.9	35.2
Температура плавления, $T_{пл}$ в К	2073	3413	3433	3448	3873	3113	4163	4073	2873
Микротвёрдость, ГПа	27.2	31.5	28.5	35.8	35.0	15.0	23.0	16.0	17.8

Заключение

Предложен метод прогноза каталитических свойств химических веществ, на основе которого разработан ряд критериев, характеризующих склонность элементов к проявлению каталитической активности, которая, аналогично многим другим характеристикам, является периодическим свойством элемента, зависящем от его положения в ПС, где проявляются вертикальные, горизонтальные и диагональные аналогии.

Рецензент: Самихов Ш.Ф.-д.т.н., профессор кафедры “Технология химических производств” Таджикского национального университета.

Литература

1. Корольков, Д. В. Основы неорганической химии: пособие для учителей / Д. В. Корольков. – М.: Просвещение, 1982. – 270 с.
2. Дикерсон, Р. Основные законы химии: в 2 т. Т. 1 / Р. Дикерсон, Г. Грей, Дж. Хейт. – М.: Мир, 1982. – 644 с.
3. Князев, Д. А. Неорганическая химия / Д. А. Князев, С. Н. Смарыгин. – М.: Высшая школа, 1990. – 430 с.
4. Павлов, Н. Н. Теоретические основы общей химии / Н. Н. Павлов. – М.: Высшая школа, 1978. – 304 с.
5. Джураев, Т. Д. Применение кристаллохимической теории наследственности в неорганической природе для прогноза катализаторов химических реакций / Т. Д. Джураев, Э. Р. Газизова, М. А. Иззатуллоев, Б. С. Сафаров // Политехнический вестник. Серия: Инженерные исследования. – 2025. – № 1(69). – С. 32–37.
6. Горюнова, Н. А. Сложные алмазоподобные полупроводники / Н. А. Горюнова. – М.: Советское радио, 1968. – 228 с.
7. Вигдорович, В. Н. Анализ изоэлектронных изоядерных рядов полновалентных четырёхэлектронных соединений как системы двухкомпонентных химических соединений / В. Н. Вигдорович, Т. Д. Джураев // Известия АН СССР. Неорганические материалы. – 1985. – Т. 21, № 3. – С. 406–410.
8. Вигдорович, В. Н. Оценка числа и систематизация двухкомпонентных ионно-ковалентных химических соединений / В. Н. Вигдорович, Т. Д. Джураев, В. А. Ханин // Известия АН СССР. Неорганические материалы. – 1989. – Т. 25, № 1. – С. 71–75.
9. Лякишев, Н. П. Диаграммы состояния двойных металлических систем: в 3 т. Т. 2 / Н. П. Лякишев, О. А. Банных, Л. Л. Рохлин [и др.]. – М.: Машиностроение, 1997. – 1024 с.
10. Wells, A. F. Structural Inorganic Chemistry / A. F. Wells. – 5th ed. – Oxford: Clarendon Press, 1986. – Vols. 1–3. – 1670 p.

Reference

1. Korolkov, D. V. Fundamentals of Inorganic Chemistry: A Teacher's Manual / D. V. Korolkov. Moscow: Prosveshchenie, 1982. 270 p.
2. Dickerson, R. Fundamental Laws of Chemistry: in 2 volumes. Vol. 1 / R. Dickerson, G. Gray, J. Heit. Moscow: Mir, 1982. 644 p.

3. Knyazev, D. A. Inorganic Chemistry / D. A. Knyazev, S. N. Smargin. Moscow: Vysshaya shkola, 1990. 430 p.
4. Pavlov, N. N. Theoretical Foundations of General Chemistry / N. N. Pavlov. Moscow: Vysshaya shkola, 1978. 304 p.
5. Dzhuraev, T. D. Application of the crystal-chemical theory of heredity in inorganic nature for predicting catalysts for chemical reactions / T. D. Dzhuraev, E. R. Gazizova, M. A. Izzatulloev, B. S. Safarov // Polytechnic Bulletin. Series: Engineering Research. - 2025. - No. 1 (69). - P. 32-37.
6. Goryunova, N. A. Complex diamond-like semiconductors / N. A. Goryunova. - Moscow: Sovetskoye Radio, 1968. - 228 p.
7. Vigdorovich, V. N. Analysis of isoelectronic isonuclear series of full-valent four-electron compounds as a system of two-component chemical compounds / V. N. Vigdorovich, T. D. Dzhuraev // Bulletin of the USSR Academy of Sciences. Inorganic materials. - 1985. - Vol. 21, No. 3. - P. 406-410.
8. Vigdorovich, V. N. Estimation of the number and systematization of two-component ionic-covalent chemical compounds / V. N. Vigdorovich, T. D. Dzhuraev, V. A. Khanin // Bulletin of the USSR Academy of Sciences. Inorganic materials. - 1989. - Vol. 25, No. 1. - P. 71-75.
9. Lyakishev, N. P. State diagrams of binary metallic systems: in 3 vols. Vol. 2 / N. P. Lyakishev, O. A. Bannykh, L. L. Rokhlin [et al.]. - Moscow: Mashinostroenie, 1997. - 1024 p.
10. Wells, A. F. Structural Inorganic Chemistry / A. F. Wells. - 5th ed. - Oxford: Clarendon Press, 1986. - Vols. 1-3. - 1670 p.

МАЪЛУМОТ ДАР БОРАИ МУАЛЛИФОН-СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ-INFORMATION ABOUT AUTHORS

TJ	RU	EN
жураев Тухтасун жураевич	Джураев Тухтасун Джураевич	Juraev Tukhtasun Juraevich
доктори илмҳои химия, профессор	доктор химических наук, профессор	doctor of chemical sciences, professor
Донишгоҳи техникии Тоҷикистон ба номи академик М.С. Осимӣ	Таджикский технический университет имени академика М.С. Осими	Tajik Technical University named after Academician M.S. Osimi
E-mail: mcm45@mail.ru		
TJ	RU	EN
Газизова Эльвира Рашитовна	Газизова Эльвира Рашитовна	Gazizova Elvira Rashitovna
номзади илмҳои техникӣ, дотсент	кандидат технических наук, доцент	candidate of technical sciences, associate professor
Донишгоҳи техникии Тоҷикистон ба номи академик М.С. Осимӣ	Таджикский технический университет имени академика М.С. Осими	Tajik Technical University named after Academician M.S. Osimi
E-mail: mcm45@mail.ru		
TJ	RU	EN
Иззаутуллоев Мубориз Акрамхонович	Иззаутуллоев Мубориз Акрамхонович	Izzatulloev Muboriz Akramkhonovich
номзади илмҳои техникӣ	кандидат технических наук	candidate of technical sciences
Донишгоҳи техникии Тоҷикистон ба номи академик М.С. Осимӣ	Таджикский технический университет имени академика М.С. Осими	Tajik Technical University named after Academician M.S. Osimi
E-mail: muboriz88@bk.ru		

ИССЛЕДОВАНИЕ ТЕМПЕРАТУРНОГО ФАКТОРА ПРИ ПОСТАДИЙНОЙ ЭКСТРАКЦИИ Fe(III) И Zn(II) ИЗ ХЛОРИДНЫХ РАСТВОРОВ

¹Д.Л. Илизаров, ¹Н.Б. Кокоева, ²Н.В. Мартюшев

¹Северо-Кавказский горно-металлургический институт (Государственный технологический университет),
Владикавказ, Россия

²Национальный исследовательский Томский политехнический университет, Томск, Россия

В работе исследовано влияние температуры на процесс постадийной экстракции Fe(III) и Zn(II) из хлоридных растворов трибутилфосфатом. Установлено, что изменение температурного режима оказывает существенное влияние на коэффициенты распределения металлов, степень их извлечения и селективность разделения компонентов. Эксперименты проводились на модельных хлоридных растворах, содержащих Fe(III) и Zn(II), при температурах от 20 до 65°C. В качестве экстрагента использовали трибутилфосфат концентрацией 50 об. %, разбавленный керосином. Показано, что повышение температуры до 45–55°C способствует увеличению степени извлечения Fe(III) до 96–98% после трех стадий экстракции при сравнительно низкой соэкстракции Zn(II). Максимальные значения коэффициента разделения Fe/Zn составили 28–31. Установлено, что дальнейшее повышение температуры приводит к росту извлечения Zn(II), ухудшению разделения фаз и снижению селективности процесса. Исследовано распределение компонентов по стадиям экстракции и показано, что основная часть Fe(III) извлекается уже на первой стадии процесса. Полученные результаты могут быть использованы при разработке технологий очистки многокомпонентных гидрометаллургических растворов и никелевых электролитов от соединений железа без применения дополнительных осадительных операций.

Ключевые слова: Fe(III); Zn(II); хлоридные растворы; экстракция; трибутилфосфат; температура.

ТАДҚИҚ ОМИЛИ ҲАРОРАТ ҲАНГОМИ ЭКСТРАКЦИЯИ ЗИНА БА ЗИНАИ Fe(III) ВА Zn(II) АЗ МАҲЛУЛҲОИ ХЛОРИДӢ

¹Д.Л. Илизаров, ¹Н.Б. Кокоева, ²Н.В. Мартюшев

¹Донишқадаи кӯҳӣ-металлургии Қафқози Шимолӣ (Донишгоҳи давлатии технологӣ), ш. Владикавказ, Россия

²Донишгоҳи политехникии Томск, ш. Томск, Россия

Дар қор таъсири ҳарорат ба раванди экстракцияи зина ба зинаи Fe(III) ва Zn(II) аз маҳлулҳои хлоридӣ бо истифодаи трибутилфосфат тадқиқ карда шудааст. Муайян гардид, ки тағйирёбии речаи ҳарорат ба зарифҳои тақсимишавии металлҳо, дараҷаи истихроҷи онҳо ва селективнокии ҷудокунии компонентҳо таъсири назаррас мерасонад. Таҷрибаҳо дар маҳлулҳои модели хлоридӣ, ки дорои Fe(III) ва Zn(II) мебошанд, дар ҳарорати аз 20 то 65°C гузаронида шуданд. Ҳамчун экстрагент трибутилфосфати дорои консентратсияи 50 ҳаҷм.% истифода шуд. Нишон дода шуд, ки баланд шудани ҳарорат то 45–55°C боиси зиёд шудани дараҷаи истихроҷи Fe(III) то 96–98% пас аз се марҳилаи экстракция мегардад, дар ҳоле ки ҳамзамон истихроҷи Zn(II) нисбатан паст боқӣ мемонад. Қиматҳои максималии зарифи ҷудокунӣ Fe/Zn ба 28–31 расиданд. Муайян гардид, ки баландшавии минбаъдаи ҳарорат боиси зиёд шудани истихроҷи Zn(II), бад шудани ҷудошавии фазаҳо ва паст шудани селективнокии раванд мегардад. Натиҷаҳои бадастомада метавонанд ҳангоми таҳияи технологияҳои тозакунии маҳлулҳои бисёркомпонентии гидрометаллургӣ ва электролитҳои никелӣ аз пайвастиҳои оҳан истифода шаванд.

Калидвоژهаҳо: Fe(III); Zn(II); маҳлулҳои хлоридӣ; экстракция; трибутилфосфат; ҳарорат.

STUDY OF THE TEMPERATURE FACTOR IN STAGE-BY-STAGE EXTRACTION OF Fe(III) AND Zn(II) FROM CHLORIDE SOLUTIONS

¹D.L. Ilizarov, ¹N.B. Kokoeva, ²N.V. Martyshev

¹North Caucasus Mining and Metallurgy Institute (State Technological University), Vladikavkaz, Russia

²National Research Tomsk Polytechnic University, Tomsk, Russia

The paper investigates the influence of temperature on the stage-by-stage extraction of Fe(III) and Zn(II) from chloride solutions using tributyl phosphate. It was established that changes in temperature significantly affect the distribution coefficients of metals, extraction efficiency, and separation selectivity. Experiments were carried out using model chloride solutions containing Fe(III) and Zn(II) at temperatures ranging from 20 to 65°C. Tributyl phosphate with a concentration of 50 vol.% diluted in kerosene was used as the extractant. It was shown that increasing the temperature to 45–55°C promotes an increase in Fe(III) extraction up to 96–98% after three extraction stages while maintaining relatively low Zn(II) co-extraction. The maximum Fe/Zn separation coefficient reached 28–31. It was established that further temperature increase leads to higher Zn(II) extraction, deterioration of phase separation, and reduction of process selectivity. The distribution of components over the extraction stages was investigated, showing that the main part of Fe(III) is extracted already at the first stage of the process. The obtained results can be used in the development of technologies for purification of multicomponent hydrometallurgical solutions and nickel electrolytes from iron compounds without additional precipitation operations.

Keywords: Fe(III); Zn(II); chloride solutions; extraction; tributyl phosphate; temperature.

Введение

Современное развитие гидрометаллургических технологий связано с необходимостью переработки сложного многокомпонентного сырья, а также с вовлечением в переработку техногенных отходов и растворов различного происхождения. В условиях постепенного истощения богатых месторождений возрастает значение процессов, позволяющих эффективно извлекать цветные металлы из бедных концентратов, никелевых электролитов, растворов выщелачивания и различных техногенных продуктов. Одной из основных проблем при переработке подобных систем остается недостаточная селективность разделения компонентов, особенно в случае совместного присутствия железа и цветных металлов в растворе [1-3].

Хлоридные растворы представляют значительный интерес для гидрометаллургии благодаря высокой растворимости металлических соединений и возможности интенсификации процессов экстракционного разделения. Вместе с тем присутствие Fe(III) и Zn(II) в одной системе существенно осложняет процесс селективного извлечения. Это связано с тем, что в хлоридных средах данные металлы способны образовывать устойчивые комплексные соединения, поведение которых в процессе экстракции во многом оказывается близким [4-6]. В результате при использовании традиционных методов экстракции часто наблюдается совместное извлечение железа и цинка, что приводит к снижению качества разделения и увеличению расхода реагентов.

Сейчас для извлечения железа из хлоридных растворов довольно часто применяют нейтральные экстрагенты, прежде всего трибутилфосфат. На практике обычно используют ТБФ концентрацией около 50 об.%, поскольку именно в этом диапазоне система работает наиболее устойчиво, а извлечение Fe(III) достигает 88–96%. При этом селективность процесса сильно зависит не только от концентрации HCl, но и от температуры, соотношения фаз О:В=1:1 и даже времени контакта фаз. Например, при содержании соляной кислоты ниже 4,0 моль/дм³ устойчивость хлоридных комплексов железа начинает заметно снижаться, а коэффициент распределения D_{Fe} уменьшается почти в 1,5–2 раза [7–10].

В литературе достаточно подробно рассмотрены вопросы влияния кислотности раствора и концентрации экстрагента, однако температурный фактор до сих пор изучен не так хорошо. Особенно это относится к постадийному введению органической фазы. А ведь именно температура, во многом определяет скорость массопереноса между фазами и условия образования комплексов FeCl₄⁻. В ряде работ отмечалось, что уже при нагреве раствора до 45–50°C коэффициент распределения железа возрастает с 5,1 до 12,6, а степень извлечения Fe(III) после 3 стадий достигает 95–96,2%.

Особый интерес в последние годы начинают вызывать именно постадийные схемы экстракционного разделения, при которых органическая фаза вводится в систему не однократно, а последовательно отдельными порциями. Обычно количество стадий составляет от 3 до 5, хотя в ряде технологических схем их число может быть и больше. Подобный подход позволяет достаточно гибко регулировать распределение компонентов между фазами и управлять селективностью процесса без существенного изменения состава исходного раствора или концентрации экстрагента. Это имеет большое значение для многокомпонентных гидрометаллургических систем, где одновременно присутствуют железо, цинк и другие цветные металлы. При этом становится возможным поэтапное извлечение компонентов с различной степенью сродства к органической фазе. Особенно важно это для хлоридных растворов, поскольку в подобных системах устойчивость комплексных соединений металлов может существенно изменяться даже при незначительном изменении температуры или кислотности среды.

При постадийной схеме уже на первых стадиях процесса происходит преимущественное извлечение Fe(III).

Тогда как переход Zn(II) в органическую фазу остается сравнительно небольшим. В большинстве случаев извлечение цинка после первой стадии не превышает 10–15%, а после трех стадий обычно находится в пределах 18–25%. Для растворов с содержанием железа порядка 18–22 г/дм³ и концентрацией Zn(II) около 8–12 г/дм³ это особенно важно, поскольку наличие железа заметно осложняет последующие стадии переработки растворов, увеличивает расход реагентов и ухудшает стабильность работы технологической схемы в целом. Особенно сильно это проявляется при очистке никелевых электролитов и переработке многокомпонентных хлоридных растворов [11–14]. Кроме

того избыток железа в растворах может приводить к дополнительному загрязнению товарных продуктов и вызывать необходимость применения дополнительных осадительных операций. Это усложняет технологическую схему процесса и увеличивает себестоимость переработки.

Следует отметить, что температурный фактор в подобных системах оказывает достаточно сложное влияние на процесс экстракции. Причем влияние это нельзя назвать однозначным. С одной стороны повышение температуры приводит к ускорению массопереноса между фазами и способствует более интенсивному образованию экстрагируемых хлоридных комплексов железа. В результате коэффициент распределения Fe(III) начинает заметно возрастать. Так, при повышении температуры от 20 до 50°C степень извлечения железа после трех стадий может увеличиваться с 88–90 до 96–98%, а остаточная концентрация Fe(III) в растворе снижается менее чем до 1 г/дм³. Процесс идет быстрее. Кроме того уменьшается необходимое количество стадий экстракции для достижения требуемой степени очистки раствора. В ряде случаев это позволяет сократить расход органической фазы почти на четверть. Для промышленных схем очистки растворов подобный эффект имеет достаточно большое значение.

Но одновременно при дальнейшем повышении температуры начинают проявляться уже и отрицательные эффекты.

Это тоже достаточно хорошо заметно. При нагреве системы выше 60°C постепенно усиливается соэкстракция Zn(II) . Например, если при 45–50°C извлечение цинка после трех стадий обычно составляет около 22–25%, то при 65°C оно уже достигает 30–34%. Одновременно коэффициент разделения Fe/Zn уменьшается практически в 1,5 раза. В результате селективность процесса начинает ухудшаться, несмотря на сохраняющееся высокое извлечение железа. Кроме того повышение температуры приводит к изменению условий разделения фаз после экстракции. Иногда процесс становится менее устойчивым.

При температурах выше 55–60°C начинает возрастать время разделения органической и водной фаз. Если при 20°C расслоение обычно происходит за 2,5–3 мин, то при 65°C этот показатель может достигать уже 6–7 мин, а в некоторых опытах и больше. В отдельных случаях появляются устойчивые межфазные пленки и эмульсионные прослойки толщиной несколько миллиметров. Они осложняют проведение процесса и могут приводить к дополнительным потерям органической фазы. Растворимость трибутилфосфата в водной фазе также возрастает. Иногда потери ТБФ увеличиваются почти в 2 раза. Для лабораторных условий это не всегда критично, однако при промышленной переработке больших объемов растворов подобные потери уже становятся достаточно существенными.

При этом именно сочетание постадийной схемы экстракции и умеренного температурного воздействия позволяет получить наиболее благоприятные технологические показатели процесса. Установлено, что при температурах порядка 45–55°C требуемая степень очистки растворов достигается уже после 3 стадий экстракции, тогда как при комнатной температуре обычно требуется не менее 4 стадий. За счет этого уменьшается расход органической фазы и сокращается общее количество используемого экстрагента. Для гидрометаллургических схем переработки растворов объемом несколько м³/ч это имеет достаточно большое значение. Особенно если учитывать высокую стоимость экстрагентов и необходимость их последующей регенерации.

Следует отметить и еще одну особенность подобных систем.

Температура влияет не только на степень извлечения компонентов, но и на устойчивость хлоридных комплексов металлов в растворе. Для Fe(III) повышение температуры до 45–55°C способствует более интенсивному образованию комплексов типа FeCl_4^- , которые достаточно хорошо сольватируются трибутилфосфатом при концентрации ТБФ около 50 об.%. Для Zn(II) такой эффект в области умеренных температур выражен значительно слабее. Именно поэтому в диапазоне 45–55°C удается получить наиболее высокие значения коэффициента разделения Fe/Zn . Однако при дальнейшем нагреве системы ситуация постепенно начинает изменяться. Усиливается образование экстрагируемых хлоридных форм цинка, способных переходить в органическую фазу. Это уже ухудшает селективность разделения компонентов.

Таким образом температурный режим является одним из наиболее важных факторов, определяющих эффективность постадийной экстракции Fe(III) и Zn(II) из хлоридных растворов.

Повышение температуры до определенного предела способствует росту коэффициента распределения железа и увеличению степени его извлечения. Однако слишком сильный нагрев уже приводит к ухудшению селективности разделения, усилению соэкстракции $Zn(II)$ и ухудшению гидродинамических характеристик системы. Поэтому подбор оптимального температурного диапазона остается одной из наиболее важных задач при разработке технологий очистки хлоридных растворов от соединений железа.

В связи с этим исследование влияния температуры на постадийную экстракцию $Fe(III)$ и $Zn(II)$ из хлоридных растворов, представляет как научный так и практический интерес для современной гидрометаллургии [17].

Целью работы является исследование влияния температуры на закономерности постадийной экстракции $Fe(III)$ и $Zn(II)$ из хлоридных растворов трибутилфосфатом, а также установление условий, обеспечивающих повышение селективности разделения железа и цинка за счет изменения температурного режима процесса.

Материалы и методы исследования

Исследование процесса постадийной экстракции $Fe(III)$ и $Zn(II)$ из хлоридных растворов проводилось на модельных растворах, состав которых подбирался с учетом концентраций компонентов, характерных для гидрометаллургических растворов и технологических электролитов. Для приготовления растворов использовали реактивы квалификации «х.ч.» и дистиллированную воду. В качестве источников железа и цинка применяли $FeCl_3 \cdot 6H_2O$ и $ZnCl_2$. Концентрация $Fe(III)$ в исходном растворе составляла 18–22 г/дм³, $Zn(II)$ – 8–12 г/дм³. Концентрация соляной кислоты поддерживалась на уровне 4,0–4,5 моль/дм³, поскольку при меньших концентрациях наблюдалось снижение устойчивости хлоридных комплексов железа и ухудшение экстракционных характеристик системы.

В качестве экстрагента использовали трибутилфосфат марки «ч.д.а.». Экстракцию проводили в термостатируемых делительных воронках. Объем водной фазы составлял 100 см³, органической— 100 см³, соотношение фаз О:В 1:1. Продолжительность контакта фаз составляла 5 мин, что согласно предварительным экспериментам обеспечивало достижение состояния, близкого к равновесному. После окончания перемешивания разделение фаз происходило в течение 3–7 мин в зависимости от температуры процесса. При температурах выше 50°C наблюдалось некоторое увеличение времени разделения фаз, вероятно связанное со снижением межфазного натяжения и изменением вязкости органической фазы.

Исследование температурного фактора проводили в диапазоне от 20 до 65°C. Основные серии опытов выполнялись при температурах 20, 35, 50 и 65°C. Поддержание температуры осуществляли с использованием ультратермостата UTU-4 с точностью поддержания температуры $\pm 0,5^\circ C$. Контроль температуры растворов производили цифровым термометром Testo 735-2. Перед началом каждого опыта водную и органическую фазы выдерживали в термостате не менее 15 мин для установления стабильного температурного режима.

Постадийную экстракцию осуществляли последовательной обработкой исходного раствора свежими порциями органической фазы. Количество стадий составляло от 3 до 5 в зависимости от температуры процесса. После каждой стадии производили отделение органической фазы и отбор проб водной фазы для анализа остаточного содержания $Fe(III)$ и $Zn(II)$. Объем отбираемой пробы составлял 5 см³. Установлено, что при температурах 50–65°C степень извлечения $Fe(III)$ на первой стадии возрастала на 12–18% по сравнению с процессом при 20°C, тогда как извлечение $Zn(II)$ изменялось менее значительно.

Определение содержания железа проводили фотометрическим методом на спектрофотометре КФК-3-01 с использованием сульфосалициловой кислоты после восстановления $Fe(III)$ до $Fe(II)$. Оптическую плотность измеряли при длине волны 425 нм. Содержание $Zn(II)$ определяли методом комплексонометрического титрования раствором трилона Б концентрацией 0,05 моль/дм³ с индикатором эриохром черный Т. Для контроля кислотности растворов использовали рН-метр HANNA HI 2211 с точностью измерения $\pm 0,01$ рН.

На основании экспериментальных данных рассчитывали коэффициенты распределения металлов D по уравнению отношения концентрации компонента в органической фазе к его остаточной концентрации в водной фазе. Коэффициент разделения $\beta_{\text{Fe/Zn}}$ определяли как отношение коэффициентов распределения железа и цинка. Для повышения достоверности результатов каждый эксперимент проводили не менее трех раз. Среднеквадратичное отклонение результатов не превышало 5%.

Полученные экспериментальные данные обрабатывали с использованием программ Microsoft Excel 2019 и OriginPro 8.5. По результатам обработки строили зависимости степени извлечения Fe(III) и Zn(II), коэффициентов распределения и коэффициентов разделения от температуры процесса и номера стадии экстракции. Анализ экспериментальных данных проводили с учетом представлений о сольватационном механизме экстракции хлоридных комплексов железа трибутилфосфатом. Предполагалось, что повышение температуры способствует ускорению процессов массопереноса и изменению устойчивости комплексных форм металлов в растворе, что оказывает непосредственное влияние на селективность процесса.

Все эксперименты проводились в условиях, исключающих выпадение осадков и образование устойчивых эмульсий. Визуальный контроль состояния фаз осуществлялся после каждой стадии экстракции. При выбранных режимах проведения процесса образование третьей фазы не наблюдалось. Полученные результаты использовались для оценки возможности практического применения постадийной экстракции при очистке технологических растворов и никелевых электролитов от соединений железа без использования осадительных операций.

Результаты исследования

В ходе проведенных исследований было установлено, что температура оказывает существенное влияние как на степень извлечения Fe(III), так и на характер распределения Zn(II) между водной и органической фазами при постадийной экстракции трибутилфосфатом из хлоридных растворов. Полученные результаты показали, что изменение температурного режима приводит к заметному изменению коэффициентов распределения компонентов и, соответственно, коэффициента разделения Fe/Zn. При этом характер изменения извлечения железа и цинка оказался различным, что представляет практический интерес при разработке процессов селективной очистки технологических растворов.

При температуре 20°C степень извлечения Fe(III) на первой стадии экстракции при соотношении фаз O:B=1:1 и концентрации ТБФ 50 об.% составляла 61,4%. После второй стадии суммарное извлечение железа возрастало до 79,8%, а после третьей стадии достигало 88,6%. Остаточная концентрация железа в водной фазе после трех стадий экстракции снижалась с исходных 20,4 г/дм³ до 2,3 г/дм³. В то же время степень извлечения Zn(II) при аналогичных условиях была значительно ниже и составляла 9,8% на первой стадии, 15,6% после второй и 18,4% после третьей стадии. Коэффициент разделения $\beta_{\text{Fe/Zn}}$ при 20°C находился в диапазоне 18,4–21,7 в зависимости от стадии процесса.

Повышение температуры до 35°C приводило к увеличению степени извлечения железа практически на всех стадиях экстракции. Так, извлечение Fe(III) на первой стадии возрастало до 69,2%, после второй стадии достигало 86,1%, а после третьей — 93,4%. Остаточное содержание железа в растворе после трех стадий составляло около 1,2 г/дм³. Одновременно наблюдалось незначительное увеличение извлечения Zn(II). На первой стадии степень извлечения цинка составляла 11,5%, после третьей — 21,8%. При этом коэффициент разделения Fe/Zn возрастал до 24,3–26,8, что свидетельствует об улучшении селективности процесса при умеренном повышении температуры.

Наиболее заметное изменение параметров процесса наблюдалось при температуре 50°C. В этих условиях степень извлечения Fe(III) на первой стадии достигала 78,5%, а после третьей стадии превышала 96%. Остаточная концентрация железа в водной фазе снижалась до 0,7–0,8 г/дм³. Коэффициент распределения D_{Fe} возрастал с 5,1 при 20°C до 12,6 при 50°C. Для Zn(II) рост коэффициента распределения происходил значительно слабее. Значение D_{Zn} изменялось лишь от 0,12 до 0,48 (Таблица 1). В результате коэффициент разделения $\beta_{\text{Fe/Zn}}$ достигал максимальных

значений 28,7–31,4. Полученные результаты показывают, что именно температурный диапазон 45–55°C является наиболее благоприятным для селективного извлечения железа из исследуемых растворов.

Таблица 1 – Влияние температуры на показатели постадийной экстракции Fe(III) и Zn(II) из хлоридных растворов
Table 1 – Effect of temperature on the performance of stage-by-stage extraction of Fe(III) and Zn(II) from chloride solutions

Температура, °C	Извлечение Fe(III) (1 стадия), %	Суммарное извлечение Fe(III) (3 стадии), %	Извлечение Zn(II) (3 стадии), %	D _{Fe}	D _{Zn}	β _{Fe/Zn}
20	61,4	88,6	18,4	5,1	0,12	21,7
35	69,2	93,4	21,8	8,4	0,31	26,8
50	78,3	95,2	24,3	12,6	0,41	30,7
65	82,1	98,1	33,8	14,3	0,76	18,9

Следует отметить, что при дальнейшем повышении температуры до 65°C характер процесса уже начинал заметно меняться.

Следует отметить, что при дальнейшем повышении температуры до 60–65°C характер процесса уже начинал заметно изменяться. Хотя суммарная степень извлечения Fe(III) после 3 стадий продолжала расти и в отдельных опытах достигала 97–98,1%, одновременно достаточно резко усиливалась экстракция Zn(II). Это было хорошо заметно. Так, при 50°C извлечение цинка обычно находилось на уровне 24–25%, а коэффициент распределения D_{Zn} составлял около 0,41. Но уже при 65°C извлечение Zn(II) возрастало до 29–34%, а значение D_{Zn} увеличивалось почти в 2 раза — до 0,76.

При этом коэффициент разделения β_{Fe/Zn} снижался с максимальных 28,7–31,4 до 18,9–20,6. В результате слишком сильный нагрев системы, уже не обеспечивал необходимую селективность процесса, даже несмотря на достаточно высокое извлечение железа. Кроме того при температурах выше 60°C наблюдалось увеличение времени разделения фаз до 6–7 мин, а в отдельных опытах — почти до 8 мин. Иногда появлялись устойчивые межфазные пленки, толщиной несколько миллиметров. Это тоже осложняло проведение экстракции.

Полученные результаты показывают, что температура влияет не только на скорость массопереноса между водной и органической фазами, но и на устойчивость хлоридных комплексов металлов в растворе. Для Fe(III) повышение температуры до 45–55°C способствует более интенсивному образованию комплексов FeCl₄⁻, которые достаточно хорошо сольватируются трибутилфосфатом при концентрации ТБФ около 50 об.%. В этих условиях коэффициент распределения D_{Fe} возрастал с 5,1 при 20°C до 12,6 при 50°C, а остаточная концентрация железа в растворе уменьшалась с 20,4 до 0,7–0,8 г/дм³. Процесс шел быстрее.

Одновременно ускорялся переход железа через межфазную границу, и уже первая стадия экстракции при 50°C обеспечивала удаление около 78–79% Fe(III) от исходного содержания. Для Zn(II) такой температурный эффект в диапазоне 20–50°C был выражен значительно слабее, поэтому извлечение цинка оставалось сравнительно небольшим — обычно не выше 18–24%. Однако при дальнейшем повышении температуры до 60–65°C ситуация постепенно менялась. Начинало усиливаться образование экстрагируемых хлоридных комплексов Zn(II), способных переходить в органическую фазу. В результате селективность разделения заметно ухудшалась, а коэффициент β_{Fe/Zn} снижался почти в 1,5 раза. Это ускоряет переход железа через межфазную границу и повышает эффективность экстракции. Для Zn(II) такой эффект при 20–50°C выражен значительно слабее. Однако при дальнейшем повышении температуры до 60–65°C начинает возрастать образование экстрагируемых хлоридных форм цинка, что ухудшает разделение компонентов.

Исследование распределения металлов по стадиям показало, что основная часть Fe(III) извлекается уже на первой стадии процесса.

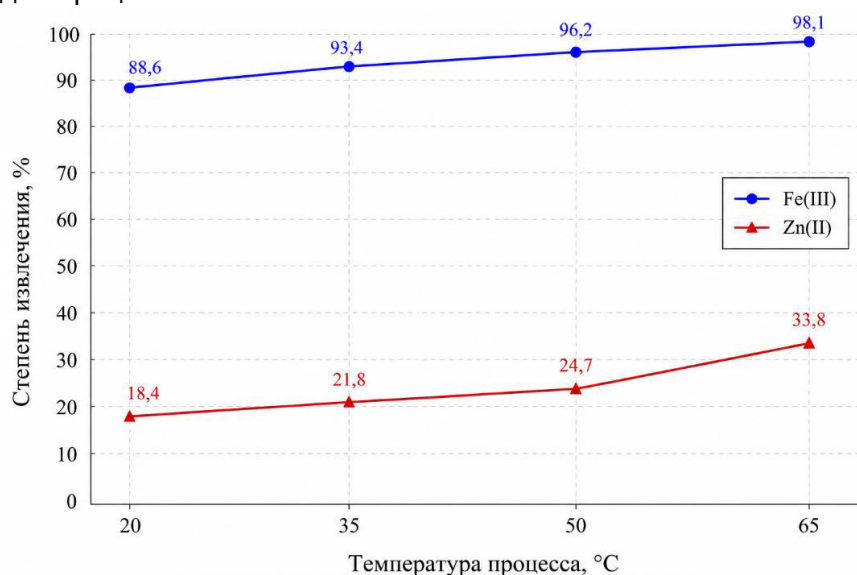


Рисунок 1 – Показана зависимость степени извлечения железа и цинка от температуры процесса. Использовался стадийный механизм экстракции

Figure 1 – Dependence of iron and zinc extraction efficiency on the process temperature using a stage-by-stage extraction mechanism

При 20°C полное разделение органической и водной фаз происходило примерно за 2,5–3 мин, это считалось вполне стабильным режимом. Но при повышении температуры до 35°C время разделения уже возрастало до 3,5–4 мин, при 50°C составляло 4–5 мин, а при 65°C иногда достигало 6–7 мин, особенно при высоком содержании ТБФ в органической фазе — порядка 70 об.%. Кроме того при температурах выше 60°C начинали появляться устойчивые межфазные пленки толщиной до нескольких миллиметров. Они осложняли проведение процесса и иногда приводили к потерям органической фазы до 0,4–0,5 г/дм³.

Температура влияла и на расход экстрагента. Это было достаточно заметно.

Так, при 20°C для снижения остаточной концентрации Fe(III) ниже 1 г/дм³ требовалось не менее 4 стадий экстракции. После трех стадий остаточное содержание железа еще составляло около 2,3 г/дм³. При 35°C этот показатель уменьшался до 1,2 г/дм³, а при 50°C аналогичный результат достигался уже после 3 стадий, при этом степень извлечения железа превышала 96–96,2%. Суммарный расход органической фазы уменьшался примерно на 22–25%, а общее количество используемого ТБФ снижалось почти на четверть. Это для промышленных схем очистки имеет большое значение. Особенно если учитывать стоимость экстрагента, расход керосина марки ТС-1 и объемы перерабатываемых растворов до 100–250 см³ в одном цикле.

Исследование влияния концентрации ТБФ также показало достаточно интересные результаты. При увеличении содержания экстрагента от 30 до 50 об.% степень извлечения Fe(III) возрастала очень заметно. Например, при температуре 50°C и концентрации ТБФ 30 об.% после трех стадий извлекалось около 84% железа, а коэффициент распределения DFe находился на уровне 6,8–7,1. При содержании ТБФ 50 об.% этот показатель уже достигал 96–96,2%, а значение DFe возрастало до 12,6. Дальнейшее повышение концентрации до 70 об.% давало уже не такой большой эффект — извлечение железа увеличивалось всего на 1–2%. Зато начинала усиливаться соэкстракция Zn(II), которая возрастала до 30–33%, увеличивалась вязкость органической фазы и ухудшалось разделение фаз после контакта. Поэтому концентрацию ТБФ 50 об.% можно считать наиболее оптимальной для данной системы.

Полученные данные показывают, что температура влияет и на коэффициент распределения железа DFe по стадиям экстракции. При 20°C после первой стадии значение DFe составляло 5,1.

После второй оно снижалось до 3,4, а после третьей уже до 2,1. При 35°C эти значения составляли соответственно 8,4; 5,9 и 3,8. При 50°C показатели были заметно выше — 12,6; 8,9 и 5,7 соответственно. Такое уменьшение коэффициента распределения по стадиям вероятно связано со снижением концентрации Fe(III) в водной фазе с 20,4 до 0,7–0,8 г/дм³, и изменением условий комплексообразования в растворе.

Исходя из полученных данных и проведенных экспериментов именно диапазон температур 45–55°C можно считать наиболее благоприятным для реализации данной технологии. В этих условиях обеспечивается наиболее оптимальное сочетание высокой степени извлечения Fe(III), сравнительно низкой соэкстракции Zn(II) и удовлетворительных гидродинамических характеристик системы. Кроме того при таком режиме уменьшается расход ТБФ и сокращается количество стадий экстракции, что особенно важно для промышленных схем очистки никелевых электролитов и многокомпонентных гидрометаллургических растворов.

Обсуждения

Полученные результаты показывают, что температурный фактор оказывает достаточно сложное влияние на процесс постадийной экстракции Fe(III) и Zn(II) из хлоридных растворов. Причем влияние это нельзя назвать однозначным. С одной стороны повышение температуры от 20 до 50°C приводит к заметному росту степени извлечения железа, а также ускоряет процессы массопереноса между органической и водной фазами. Но одновременно при температурах выше 60°C начинает усиливаться соэкстракция Zn(II), что уже ухудшает селективность разделения компонентов.

Так, при 20°C суммарное извлечение Fe(III) после трех стадий составляло около 88,6%, тогда как при 35°C этот показатель возрастал уже до 93–94%. При 50°C степень извлечения железа достигала 96–98%, а остаточная концентрация Fe(III) в растворе снижалась до 0,7–0,8 г/дм³.

Для Zn(II) температурный эффект выражен значительно слабее. Это важно. Например при 20°C извлечение цинка после трех стадий составляло около 18–19%, при 35°C возрастало до 21–22%, а при 50°C обычно не превышало 24–25%. Благодаря этому коэффициент разделения Fe/Zn достигал максимальных значений — порядка 28–31. В результате именно температурный диапазон 45–55°C можно считать наиболее благоприятным для селективного извлечения железа из исследуемых растворов.

Однако дальнейшее повышение температуры уже изменяет характер процесса. При 60–65°C извлечение Fe(III) действительно продолжает возрастать и достигает 97–98%, но одновременно начинает резко увеличиваться переход Zn(II) в органическую фазу. В ряде опытов извлечение цинка возрастало до 29–34%, а коэффициент распределения D_{Zn} увеличивался почти в 2 раза по сравнению с процессом при 50°C — с 0,41 до 0,76. При этом коэффициент разделения $\beta_{Fe/Zn}$ наоборот снижался до 18,9–20,6. Это уже ухудшало селективность процесса.

Вероятно подобное изменение связано с усилением образования экстрагируемых хлоридных комплексов цинка при высоких температурах. Кроме того возрастает растворимость органической фазы в водном растворе. При 65°C потери ТБФ достигали 0,42 г/дм³, тогда как при 20°C они составляли лишь около 0,18 г/дм³. То есть увеличение происходило более чем в 2 раза. Одновременно возрастало и время полного разделения фаз — с 2,5–3 до 6–8 мин. В некоторых опытах появлялись устойчивые межфазные пленки толщиной несколько миллиметров, осложняющие проведение процесса.

Следует отметить и достаточно важную особенность распределения металлов по стадиям экстракции. Основная часть Fe(III) извлекалась уже на первой стадии. Так, при температуре 50°C первая стадия обеспечивала удаление около 78–79% железа от исходной концентрации 20,4 г/дм³. Вторая стадия дополнительно извлекала еще около 14–15%, а вклад третьей обычно не превышал 4–5%. Для Zn(II) картина была другой. На первой стадии извлекалось около 13%, на второй — 8–10%, а на третьей еще порядка 5–6%. Благодаря этому появляется возможность управлять селективностью процесса без изменения состава раствора или соотношения фаз О:В=1:1.

Температура оказывает влияние и на кинетику процесса. Это тоже достаточно хорошо видно по полученным результатам. При 20°C состояние близкое к равновесному достигалось примерно за 4–5 мин перемешивания, при 35°C — уже за 3–4 мин, а при 50°C процесс шел еще быстрее. Но при

слишком длительном контакте фаз, порядка 8–10 мин, начинала усиливаться соэкстракция $Zn(II)$. В отдельных опытах при температурах 60–65°C извлечение цинка дополнительно возрастало еще на 3–5%. Поэтому слишком продолжительное перемешивание фаз нельзя считать целесообразным. Особенно для промышленных условий.

Проведенные исследования показывают, что повышение температуры сверх 45–55°C уже приводит к ухудшению разделения фаз, росту потерь органической фазы и усилению соэкстракции $Zn(II)$, вследствие чего селективность процесса начинает снижаться. Поэтому именно диапазон 45–55°C можно считать наиболее оптимальным для реализации данной технологии в гидрометаллургических схемах очистки растворов от соединений железа.

Выводы

Установлено, что температура достаточно сильно влияет на процесс постадийной экстракции $Fe(III)$ и $Zn(II)$ из хлоридных растворов трибутилфосфатом. Это было хорошо заметно. При повышении температуры от 20 до 50°C коэффициент распределения железа D_{Fe} возрастал с 5,1 до 12,6, а степень извлечения $Fe(III)$ после 3 стадий увеличивалась с 88,6 до 96,2%. При этом извлечение $Zn(II)$ менялось значительно слабее — только с 18,4 до 24–25%. Благодаря этому сохранялась высокая селективность процесса, а коэффициент разделения Fe/Zn достигал 28–31. Наиболее благоприятным оказался диапазон температур 45–55°C. Именно в этих условиях процесс шел наиболее стабильно, а разделение компонентов было лучшим.

Однако дальнейшее повышение температуры уже ухудшало технологические показатели процесса. Несмотря на то, что степень извлечения $Fe(III)$ возрастала до 97–98%, одновременно усиливалась соэкстракция $Zn(II)$, которая достигала 29–34%. Коэффициент разделения Fe/Zn при этом снижался до 18,9–20,6. Кроме того начинало ухудшаться разделение фаз. Время расслоения органической и водной фаз увеличивалось с 2,5–3 до 6–7 мин, возрастала растворимость ТБФ в водной фазе — с 0,18 до 0,42 г/дм³. Появлялись и устойчивые межфазные пленки, иногда толщиной несколько миллиметров. Это осложняло проведение процесса, особенно при переработке больших объемов растворов.

Установлены и основные закономерности распределения компонентов по стадиям экстракции. Показано, что большая часть $Fe(III)$ извлекается уже на первой стадии. Так, при температуре 50°C первая стадия обеспечивала удаление около 78–79% железа от исходной концентрации 20,4 г/дм³. Вторая стадия дополнительно извлекала еще 14–15%, а вклад третьей обычно не превышал 4–5%. Для $Zn(II)$ картина была другой. Цинк распределялся между стадиями более равномерно: на первой стадии извлекалось около 13%, на второй — 8–10%, а на третьей еще порядка 5–6%. Благодаря этому постадийная схема позволяет достаточно эффективно управлять селективностью процесса, без изменения состава раствора или концентрации HCl .

Показано, что температура оказывает влияние не только на степень извлечения металлов, но и на кинетику процесса. При повышении температуры ускоряется массоперенос между фазами и уменьшается время достижения состояния близкого к равновесному. Так, при 20°C для достижения равновесия требовалось около 4–5 мин перемешивания, тогда как при 50°C аналогичное состояние достигалось уже через 2–3 мин. При дальнейшем увеличении времени контакта фаз до 10 мин степень извлечения $Fe(III)$ изменялась незначительно, однако одновременно возрастала соэкстракция $Zn(II)$.

Установлено так же, что применение постадийной схемы экстракции позволяет уменьшить расход органической фазы и сократить количество стадий процесса. При температуре 50°C требуемая степень очистки раствора достигалась уже после 3 стадий экстракции, тогда как при 20°C требовалось не менее 4 стадий. Суммарный расход органической фазы при этом снижался примерно на 22–25%, что имеет достаточно большое практическое значение для гидрометаллургических процессов очистки растворов.

Полученные результаты могут быть использованы при разработке технологий очистки многокомпонентных хлоридных растворов и никелевых электролитов от соединений железа без применения дополнительных осадительных операций. Использование оптимального температурного диапазона 45–55°C и постадийной схемы экстракции позволяет повысить эффективность

гидрометаллургической переработки сырья, снизить расход реагентов и упростить технологическую схему процесса.

Рецензент: Аврамчук В.С. — д.т.н., профессор Сибирского государственного университета науки и технологий имени академика М.Ф. Решетнева.

Литература

1. Снурников, А. П. Комплексное использование минеральных ресурсов в цветной металлургии / А. П. Снурников. – М.: Металлургия, 1986. – 384 с.
2. Набойченко, С. С. Автоклавная гидрометаллургия цветных металлов / С. С. Набойченко, Л. П. Ни, Я. М. Шнеерсон, А. В. Чугаев. – Екатеринбург: Изд-во УГТУ-УПИ, 2002. – 940 с.
3. Kruger, J. Соображения по проблеме железа при гидрометаллургическом извлечении цинка / J. Kruger, R. Pullenberg // Erzmetall. – 1981. – № 7–8. – С. 380–387.
4. Jiang, K. The Process Improvement Researches for Zinc Hydrometallurgy / K. Jiang, H. Wang, B. Zhang // World of Metallurgy – ERZMETALL. – 2015. – Vol. 68, No. 3. – P. 181–185.
5. Kongolo, K. Cobalt and Zinc Recovery from Copper Sulphate Solution by Solvent Extraction / K. Kongolo, M. D. Mwema, A. N. Banza, E. Gock // Minerals Engineering. – 2003. – Vol. 16, No. 12. – P. 1371–1374. – DOI: 10.1016/j.mineng.2003.09.001.
6. Улахович, Н. А. Экстракция как метод разделения и концентрирования / Н. А. Улахович // Соросовский образовательный журнал. – 1999. – № 6. – С. 39–46.
7. Гулевич, А. Л. Экстракционные методы разделения и концентрирования веществ: пособие для студентов хим. фак. спец. 1-31 05 01 «Химия (по направлениям)» / А. Л. Гулевич, С. М. Лещев, Е. М. Рахманько. – Минск: БГУ, 2009. – 153 с.
8. Воропанова, Л. А. Экстракция ионов цинка (II) из водных растворов трибутилфосфатом / Л. А. Воропанова, Н. Б. Кокоева // Цветная металлургия. – 2015. – № 5. – С. 53–59.
9. Воропанова, Л. А. Селективная экстракция железа и цинка из водных растворов трибутилфосфатом / Л. А. Воропанова, Н. Б. Кокоева // Цветная металлургия. – 2015. – № 12. – С. 30–35.
10. Пат. 2572927 РФ, МПК C22B 15/00, C22B 3/16, C25C 1/12. Экстракция ионов железа (III) из водных растворов трибутилфосфатом / Л. А. Воропанова, Н. Б. Кокоева. – № 2014136589/02; заявл. 09.09.2014; опубл. 20.01.2016.
11. Пат. 2571743 РФ, МПК C22B 3/38. Экстракция ионов цинка (II) из водных растворов трибутилфосфатом / Л. А. Воропанова, Н. Б. Кокоева. – № 2014136669/05; заявл. 09.09.2014; опубл. 20.12.2015.
12. Lum, K. H. The Modelling of ZnCl₂ Extraction and HCl Co-Extraction by TBP Diluted in ShellSol 2046 / K. H. Lum, G. W. Stevens, J. M. Perera, S. E. Kentish // Hydrometallurgy. – 2013. – Vol. 133. – P. 64–74.
13. Fleitlikh, I. Yu. Zinc Extraction from Sulphate-Chloride Solutions with Mixtures of a Trialkyl Amine and Organic Acids / I. Yu. Fleitlikh, G. L. Pashkov, N. A. Grigorieva, O. A. Logutenko // Hydrometallurgy. – 2014. – Vol. 149. – P. 110–117.
14. Zhang, K. Recovery of Gallium from Leach Solutions of Zinc Refinery Residues by Stepwise Solvent Extraction with N235 and Cyanex 272 / K. Zhang, L. Qiu, J. Tao, X. Zhong, Z. Lin, R. Wang, Z. Liu // Hydrometallurgy. – 2021. – Vol. 205. – Art. no. 105722. – DOI: 10.1016/j.hydromet.2021.105722.
15. Loan, M. Defining the Paragoethite Process for Iron Removal in Zinc Hydrometallurgy / M. Loan, O. M. G. Newman, R. M. G. Cooper, J. B. Parrow, G. M. Parkinson // Hydrometallurgy. – 2006. – Vol. 81, No. 2. – P. 104–129.
16. Wang, Y. Hydrometallurgical Process for Recovery of Cobalt from Zinc Plant Residue / Y. Wang, C. Zhou // Hydrometallurgy. – 2002. – Vol. 63, No. 3. – P. 225–234. – DOI: 10.1016/S0304-386X(01)00213-4.
17. Вольдман, Г. М. Теория гидрометаллургических процессов / Г. М. Вольдман, А. Н. Зеликман. – М.: Металлургия, 1993. – С. 303–307.

Reference

1. Snurnikov, A. P. Integrated Use of Mineral Resources in Non-Ferrous Metallurgy / A. P. Snurnikov. - Moscow: Metallurgy, 1986. - 384 p.
2. Naboychenko, S. S. Autoclave Hydrometallurgy of Non-Ferrous Metals / S. S. Naboychenko, L. P. Ni, Ya. M. Shneerson, A. V. Chugaev. - Yekaterinburg: Publishing House of USTU-UPI, 2002. - 940 p.
3. Kruger, J. Considerations on the Problem of Iron in Hydrometallurgical Extraction of Zinc / J. Kruger, R. Pullenberg // Erzmetall. - 1981. - No. 7-8. - pp. 380-387.
4. Jiang, K. The Process Improvement Researches for Zinc Hydrometallurgy / K. Jiang, H. Wang, B. Zhang // World of Metallurgy - ERZMETALL. – 2015. – Vol. 68, No. 3. – P. 181–185.
5. Kongolo, K. Cobalt and Zinc Recovery from Copper Sulphate Solution by Solvent Extraction / K. Kongolo, M. D. Mwema, A. N. Banza, E. Gock // Minerals Engineering. – 2003. – Vol. 16, No. 12. – P. 1371–1374. – DOI: 10.1016/j.mineng.2003.09.001.

6. Ulakhovich, N. A. Extraction as a Method of Separation and Concentration / N. A. Ulakhovich // Soros Educational Journal. - 1999. - No. 6. - P. 39-46.
7. Gulevich, A. L. Extraction Methods of Separation and Concentration of Substances: A Manual for Students of the Chemistry Faculty. Specialist. 1-31 05 01 "Chemistry (by Areas)" / A. L. Gulevich, S. M. Leshchev, E. M. Rakhmanko. - Minsk: BSU, 2009. - 153 p.
8. Voropanova, L. A. Extraction of Zinc (II) Ions from Aqueous Solutions with Tributyl Phosphate / L. A. Voropanova, N. B. Kokoeva // Non-Ferrous Metallurgy. - 2015. - No. 5. - P. 53-59.
9. Voropanova, L. A. Selective extraction of iron and zinc from aqueous solutions with tributyl phosphate / L. A. Voropanova, N. B. Kokoeva // Non-ferrous metallurgy. - 2015. - No. 12. - P. 30-35.
10. Patent. 2572927 RF, IPC C22B 15/00, C22B 3/16, C25C 1/12. Extraction of iron (III) ions from aqueous solutions with tributyl phosphate / L. A. Voropanova, N. B. Kokoeva. - No. 2014136589/02; declared 09.09.2014; published 20.01.2016.
11. Patent 2571743 of the Russian Federation, IPC C22B 3/38. Extraction of zinc (II) ions from aqueous solutions with tributyl phosphate / L. A. Voropanova, N. B. Kokoeva. - No. 2014136669/05; declared 09.09.2014; published 20.12.2015.
12. Lum, K. H. The Modelling of ZnCl₂ Extraction and HCl Co-Extraction by TBP Diluted in ShellSol 2046 / K. H. Lum, G. W. Stevens, J. M. Perera, S. E. Kentish // Hydrometallurgy. - 2013. - Vol. 133. - P. 64-74.
13. Fleitlikh, I. Yu. Zinc Extraction from Sulphate-Chloride Solutions with Mixtures of a Trialkyl Amine and Organic Acids / I. Yu. Fleitlikh, G. L. Pashkov, N. A. Grigorieva, O. A. Logutenko // Hydrometallurgy. - 2014. - Vol. 149. - P. 110-117.
14. Zhang, K. Recovery of Gallium from Leach Solutions of Zinc Refinery Residues by Stepwise Solvent Extraction with N235 and Cyanex 272 / K. Zhang, L. Qiu, J. Tao, X. Zhong, Z. Lin, R. Wang, Z. Liu // Hydrometallurgy. - 2021. - Vol. 205. - Art. no. 105722. - DOI: 10.1016/j.hydromet.2021.105722.
15. Loan, M. Defining the Paragoethite Process for Iron Removal in Zinc Hydrometallurgy / M. Loan, O. M. G. Newman, R. M. G. Cooper, J. B. Parrow, G. M. Parkinson // Hydrometallurgy. - 2006. - Vol. 81, No. 2. - P. 104-129.
16. Wang, Y. Hydrometallurgical Process for Recovery of Cobalt from Zinc Plant Residue / Y. Wang, C. Zhou // Hydrometallurgy. - 2002. - Vol. 63, No. 3. - P. 225-234. - DOI: 10.1016/S0304-386X(01)00213-4.
17. Voldman, G. M. Theory of hydrometallurgical processes / G. M. Voldman, A. N. Zelikman. - M.: Metallurgy, 1993. - P. 303-307.

МАЪЛУМОТ ДАР БОРАИ МУАЛЛИФОН – СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ – INFORMATION ABOUT AUTHORS

TJ	RU	EN
Илизаров Даниэль Леонидович Аспирант	Илизаров Даниэль Леонидович Аспирант	Ilizarov Daniel Leonidovich Graduate student
Донишкадаи кӯҳӣ-металлургии Қафқози Шимоли (Донишгоҳи давлатии технологӣ)	Северо-Кавказский горно- металлургический институт (Государственный технологический университет)	North Caucasian Institute of Mining and Metallurgy (State Technological University)
E-mail: ilizarov177@gmail.com		
TJ	RU	EN
Кокоева Наталья Борисовна	Кокоева Наталья Борисовна	Kokoeva Natalia Borisovna
Номзади илмҳои техникӣ, дотсент	к.т.н., доцент	Candidate of Technical Sciences, Associate Professor
Донишкадаи кӯҳӣ-металлургии Қафқози Шимоли (Донишгоҳи давлатии технологӣ)	Северо-Кавказский горно- металлургический институт (Государственный технологический университет)	North Caucasian Institute of Mining and Metallurgy (State Technological University)
E-mail: kokoeva.natali.borisovna@yandex.ru		
TJ	RU	EN
Мартюшев Никита Владимирович	Мартюшев Никита Владимирович	Martyshev Nikita Vladimirovich
Номзади илмҳои техникӣ, дотсент	к.т.н., доцент	Candidate of Technical Sciences, Associate Professor
Донишгоҳи политехникии Томск, Федератсияи Россия, ш. Томск	Томский политехнический университет, Российская Федерация, г. Томск	Tomsk Polytechnic University, Russian Federation, Tomsk
E-mail: martjushev@tpu.ru		

ИССЛЕДОВАНИЕ И ПОСТРОЕНИЕ ДИАГРАММЫ ТРОЙНОЙ СИСТЕМЫ Al-Li-Ce**Н.И. Ганиева, Х.О. Одиназода, С.С. Раджабалиев, А.Д. Шамсиддинов**

Таджикский технический университет имени академика М.С. Осими, г. Душанбе, Республика Таджикистан

В статье представлены результаты исследования тройной системы Al-Li-Ce и построения её фазовой диаграммы. Проведён анализ влияния содержания лития и церия на образование твёрдых растворов и интерметаллидов в алюминиевых сплавах, выявлены квазибинарные разрезы и их эвтектические и перитектические превращения. Исследования сплавов проводились методами рентгенофазового анализа (РФА) и дифференциально-термического анализа (ДТА), что позволило определить состав фаз, температуры кристаллизации и невариантные равновесия. Построенная диаграмма системы Al-Li-Ce даёт возможность определить фазовые и структурные изменения сплавов, что имеет практическое значение при разработке лёгких, прочных и коррозионностойких алюминиевых сплавов для аэрокосмической промышленности.

Ключевые слова: *тройная система Al-Li-Ce, фазовая диаграмма, квазибинарные разрезы, эвтектика, перитектика, проекция проверит ликвидуса.*

ТАДҚИҚ ВА СОХТАНИ ДИАГРАММАИ СИСТЕМАИ СЕГОНАИ Al-Li-Ce**Н.И. Ганиева, Х.О. Одиназода, С.С. Раджабалиев, А.Д. Шамсиддинов**

Донишгоҳи техникии Тоҷикистон ба номи академик М.С. Осимӣ, ш. Душанбе, Ҷумҳурии Тоҷикистон

Дар мақола натиҷаҳои таҳқиқи системаҳои сегонаи Al-Li-Ce ва сохтани диаграммаи фазавии он пешниҳод гардидаанд. Таҳлили таъсири миқдори литий ва церий ба ҳосилшавии ҳалҳои сахт ва интерметаллидҳо дар сплавҳои алюминий гузаронида шуд, буришҳои квазибинарӣ ва таҳлили эвтектикӣ ва перитектикӣ муайян карда шуданд. Таҳқиқоти ҳулоаҳо бо усулҳои таҳлили рентгенофазӣ (РФА) ва таҳлили дифференсиалӣ-термикӣ (ДТА) гузаронида шуд, ки ин имкон дод таркиби фазаҳоро муайян карда, ҳароратҳои кристаллизатсия ва мувозинати невариантиро муайян намояд. Диаграммаи сохтани система Al-Li-Ce имкон медиҳад, ки тағйироти фазавӣ ва сохтори сплавҳоро муайян кунанд, ки аҳамияти амалӣ дар таҳияи сплавҳои алюминий сабук, қавӣ ва муқовиматнок ба зангзанӣ барои саноати аэрокосмос дорад.

Калидвожаҳо: *системаҳои сегонаи Al-Li-Ce, диаграммаи фазавӣ, разрези квазибинарӣ, эвтектика, перитектика, проекция ликвидуса.*

STUDY AND CONSTRUCTION OF THE PHASE DIAGRAM OF THE Al-Li-Ce TERNARY SYSTEM**Ganieva N.I., Odina-zoda Kh.O., Rajabaliyev S.S., Shamsiddinov A.D.**

Tajik Technical University named after Academician M.S. Osimi, Dushanbe, Republic of Tajikistan

This paper presents the results of the study of the Al-Li-Ce ternary system and the construction of its phase diagram. An analysis of the effect of lithium and cerium content on the formation of solid solutions and intermetallic compounds in aluminum alloys was performed, and quasi-binary sections and their eutectic and peritectic transformations were identified. The alloys were studied using X-ray phase analysis (XPA) and differential thermal analysis (DTA), which allowed determining the phase compositions, crystallization temperatures, and non-variant equilibria. The constructed phase diagram of the Al-Li-Ce system makes it possible to determine phase and structural changes in the alloys, which is of practical importance in the development of lightweight, strong, and corrosion-resistant aluminum alloys for the aerospace industry.

Keywords: *Al-Li-Ce ternary system, phase diagram, quasi-binary sections, eutectic, peritectic, liquidus projection.*

Введение

Алюминий-литиевые сплавы являются новым классом широко известных алюминиевых систем и характеризуются прекрасным сочетанием механических свойств: малой плотностью, повышенным модулем упругости и достаточно высокой прочностью. Это позволяет создавать аэрокосмическую технику с меньшей массой, что даёт возможность экономии горючего, увеличения грузоподъёмности и улучшения других характеристик летательных аппаратов [1].

Алюминиевые сплавы, легированные литием, относятся к стареющим системам и отличаются сложностью фазовых и структурных превращений в процессе их термообработки. Эти изменения оказывают сильное влияние на характеристики трещиностойкости, вязкости разрушения, коррозионной стойкости и сопротивления циклическим нагрузкам. Поэтому их изучение представляет большое научное и практическое значение [1, 2].

Увеличение содержания лития уменьшает плотность алюминия. Добавка лития в пределах твёрдого раствора приводит к непрерывному увеличению удельного сопротивления. Модуль упругости алюминия возрастает с увеличением содержания лития. При максимальной растворимости лития в твёрдом растворе модуль упругости составляет 8000 кг/мм². Увеличение содержания лития

приводит к повышению прочностных характеристик алюминия. При содержании лития до 2% прочность сплавов возрастает без снижения пластичности, при дальнейшем увеличении содержания лития пластичность резко снижается. Литий при концентрациях до 0,8% придаёт алюминиевым сплавам повышенную стойкость к коррозии, более высокую, чем у чистого алюминия [3-6].

Алюминиево-цериевый сплав (Al-Ce) — это перспективный легкий материал, содержащий алюминий и редкоземельный металл церий (обычно 20–30% Ce в лигатурах). Обладает высокой жаропрочностью, улучшенной литейностью и стойкостью к коррозии, часто используется для легирования и модифицирования других сплавов, а также применяется в ответственных конструкциях.

Материалы и методы исследования

Получение сплавов. Сплавы массой 10 г выплавляли в вакуумной печи сопротивления типа СНВЭ-1.3.1/16ИЗ под избыточным давлением (0,5 МПа) инертного газа (гелия) из алюминия марки А995, лития марки ЛЭ1 и церия марки ЦеЭ-0 (электролитический, чистота 99,9 % по ТУ 48-4-529-90). Сплавление шихты проводили в корундовых тиглях. Состав полученных сплавов выборочно контролировали путём взвешивания образцов до и после сплавления.

Исследование сплавов проводилось рентгенофазовым и дифференциально-термическим методами анализов.

Рентгенофазовый анализ сплавов. Для получения информации о составе фаз в сплавах использовался метод рентгенофазового анализа, который проводился на рентгеновском дифрактометре "ДРОН-1,5" с использованием отфильтрованного (фильтр-Ni) медного $K\alpha$ -излучения.

Фазовый состав исследуемых сплавов в зависимости от информации, полученной на дифрактограмме осуществляли следующим образом [7]. Расчётом теоретических дифрактограмм определяли межплоскостное расстояние (d) и интенсивность (I) для фаз, о которых имеются только данные о типе и размерах ячейки, поконченными при расчёте экспериментальной дифрактограммы. Если при сравнении экспериментально полученных d и I с теоретическими будет наблюдаться совпадение в пределах ошибки опыта, то это указывает на присутствие в смеси этой фазы, в противном случае - фаза отсутствует. Теоретические дифрактограммы не рассчитывали для фаз, о которых имеются не только данные о типе и размере ячейки, но даже d и I . В этом случае d и I , полученные при расчёте экспериментальной дифрактограммы, сравнивались со справочными материалами. Заключение о присутствии искомой фазы получали на основании результатов сравнения.

Анализируя полученные данные, учитывали относительную интенсивность линий. От отношения количества фаз в образце зависит интенсивность линий фаз на дифрактограммах. В связи с этим возможно ослабление или даже полное исчезновение слабых линий фаз, если её количество в смеси мало. Заключение о присутствии в исследуемой смеси искомой фазы может быть, в этом случае, лишь при условии обязательного присутствия на дифрактограмме нескольких (не менее трёх) наиболее интенсивных линий.

Приготовление образцов к рентгенофазовому анализу. Порошки сплавов для рентгенофазового анализа получали напылением, напильником, либо измельчением их в агатовой ступке под вакуумным маслом ВМ-1. Перед подготовкой каждого образца напильник очищали металлической щёткой, после чего очищали ацетоном и спиртом по два раза. Во избежание попадания микрочастиц материала напильника порошки очищали магнитом. Порошок насыпали на поверхность каретки аппарата так, чтобы он тонким равномерным слоем покрыл среднюю, рабочую часть каретки. Для устойчивого прилипания порошка на поверхность каретки пипеткой наносили 3-4 капли спирта. Затем, после испарения спирта каретку с образцом вставляли в аппарат и снимали дифрактограмму от 1Е до 80 градусов по показанию счётчика аппарата. При подготовке порошка в агатовой ступке после каждого образца для удаления загрязнений её промывали ацетоном и спиртом по два раза.

Дифференциально-термический анализ (ДТА) сплавов проводили на установке марки ВДТА-8М (модернизированный вариант установки ВДТА, конструкции Института металлофизики АН Республики Украина) с использованием графитовых и корундовых тиглей в среде гелия марки ВЧ

(ТУ-51-681-75), под давлением 0,5 МПа. Навески для ДТА брались весом 1,0-1,5 г. В процессе исследования нами были приняты во внимание методические особенности проведения термического анализа, описанные в [7]. Скорость нагрева и охлаждения в зависимости от состава сплавов, варьировала в пределах от 40 до 80 град/мин. Датчиком температуры служила ($W/W + 20\%$ Re) термопара. Температуру термических эффектов определяли по кривым охлаждения. Градуировку термопар и термический анализ образцов проводили в одинаковых условиях (одинаковых скоростях нагрева и охлаждения, масс образцов, давления гелия и т.д.). Калибровку термопары производили по точкам плавления эталонов из особо чистых металлов и оксида: In- 157°C , Sn – 232°C , Al – 660°C , Cu – 1083°C , Fe - 911, 1392, 1539°C , Al_2O_3 - 2042°C . Точность измерения температуры составляла $\pm 1\%$ от измеряемой величины.

Результаты исследования

Фазовое равновесие. Фазовая диаграмма системы алюминий-литий-церий при 773K (50-100 ат. % алюминия) и 423K (0-50 ат. % алюминия) приведен на рис. 1. В системе литий-церий имеет место расслаивание в жидком и твердом состояниях, что подтверждается визуальными наблюдениями. Нижний слой состоит из церия, а верхний из лития.

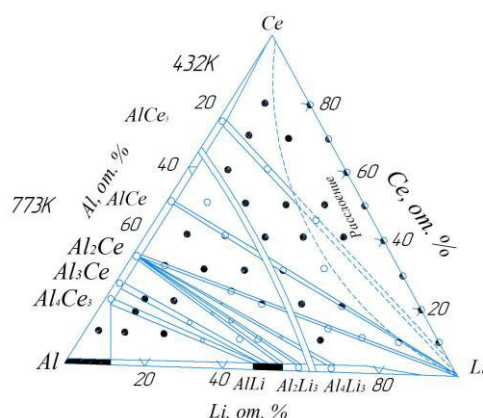


Рисунок 1 – Диаграмма фазовых равновесий системы алюминий-литий-церий
Figure 1 – Phase equilibrium diagram of the aluminum-lithium-cerium system

В тройную систему алюминий-литий-церий распространяется расслаивание, имеющее место в двойной системе литий-церий. Глубина расслаивания распространяется до 20 ат. % алюминия. Алюминий - твердый раствор находится в равновесии с двойными интерметаллидами $\text{Al}_{11}\text{Ce}_3$ и AlLi . Кроме того, соединение $\text{Al}_{11}\text{Ce}_3$ находится в двухфазном равновесии с интерметаллидом Al_4Li_9 , Al_2Li_3 и литием. Судя по незначительным изменениям периодом решеток соединений, находящихся в двойных и тройных областях, растворимость третьего компонента в них незначительна. Тройных соединений в системе Al-Li-Ce не обнаружено.

В системе Al-Li-Ce в области Al-Li- Al_2Ce нами установлены следующие квазибинарные разрезы: $\text{Al}_2\text{Ce-Li}$ и $\text{Al}_2\text{Ce-AlLi}$. Разрез $\text{Al}_4\text{Ce-AlLi}$ является частично квазибинарным, т.е. ниже 878 K сплавы данного разреза являются двухфазными.

Разрезы $\text{Al}_2\text{Ce-Li}$ (рис. 2а). Исследование сплавов данного разреза методами РФА и ДТА показали, что все они состоят из двух фаз: α -твердого раствора на основе Al_2Ce и β - твердого раствора на основе лития. Взаимная растворимость компонентов в данной системе незначительна. На термограммах всех сплавов, расположенных на указанном разрезе, обнаружено по два термических эффекта, первый из которых относится к кристаллизации твердого раствора на основе Al_2Ce , и второй термический эффект относится к перитектической реакции $\text{Ж} + \text{Al}_2\text{Ce} \leftrightarrow \beta \text{ Li}$, протекающей при 873K и 93 ат.% Li. Таким образом, разрез $\text{Al}_2\text{Ce-Li}$ является квазибинарной системой перитектического типа.

Разрезы $\text{Al}_2\text{Ce-AlLi}$ (рис. 2б). Сплавы данного разреза также исследовались методами РФА и ДТА анализов. Показано, что все сплавы являются двухфазными. По результатам исследования

построено политермическое сечение $\text{Al}_2\text{Ce}-\text{AlLi}$. Как видно из рис. 2, система $\text{Al}_2\text{Ce}-\text{AlLi}$ является эвтектической. Эвтектика кристаллизуется при 843 K по реакции $\text{Ж} \leftrightarrow \alpha\text{-Al}_2\text{Ce} + \beta\text{-AlLi}$.

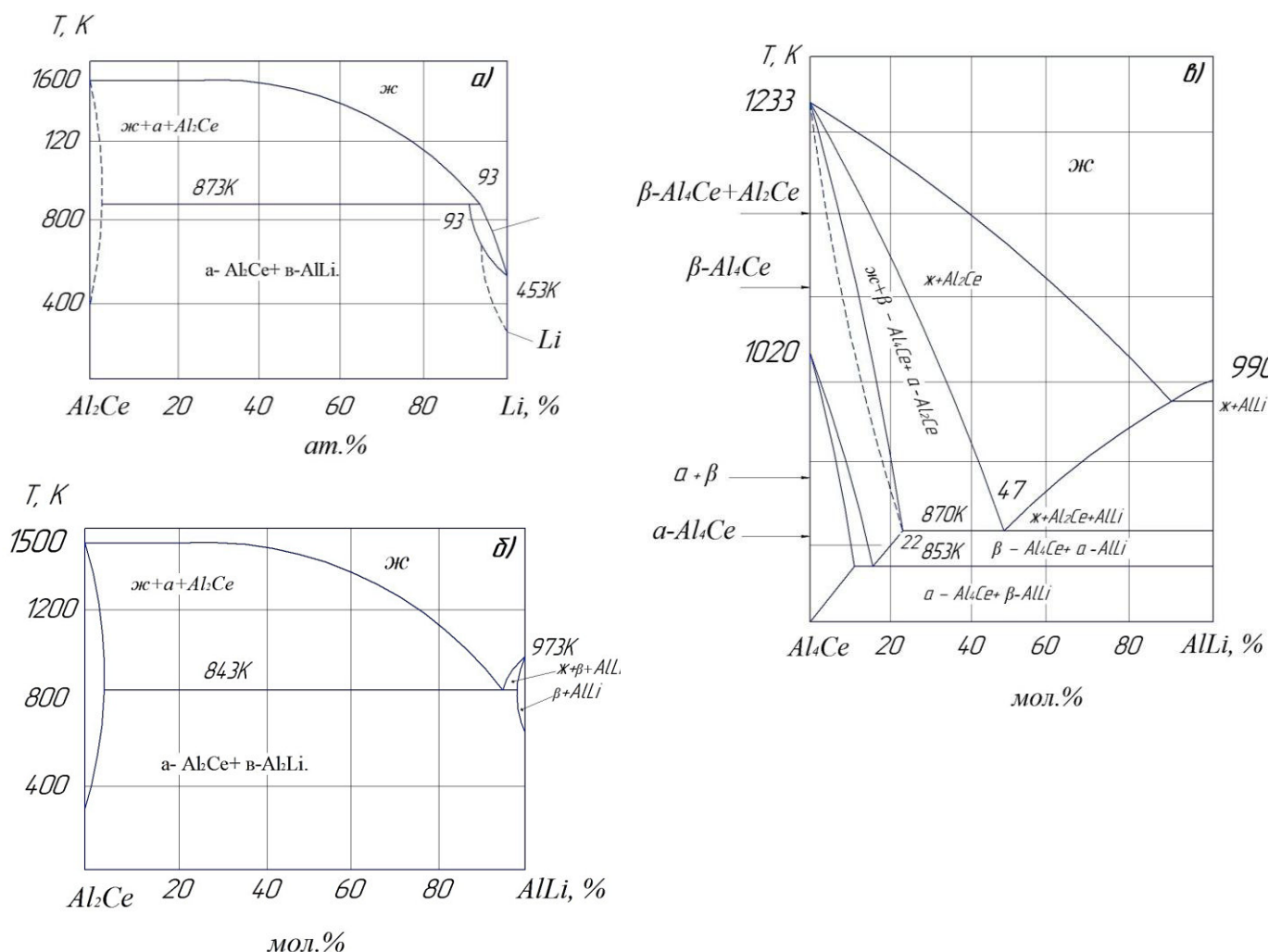


Рисунок 2 – Политермические разрезы системы Al-Li-Ce: разрезы $\text{Al}_2\text{Ce}-\text{Li}$ (а); разрезы $\text{Al}_2\text{Ce}-\text{AlLi}$ (б); разрезы $\text{Al}_4\text{Ce}-\text{AlLi}$ (в)

Figure 2 – Polythermal sections of the Al-Li-Ce system: sections $\text{Al}_2\text{Ce}-\text{Li}$ (a); sections $\text{Al}_2\text{Ce}-\text{AlLi}$ (б); sections $\text{Al}_4\text{Ce}-\text{AlLi}$ (в)

Разрезы $\text{Al}_4\text{Ce}-\text{AlLi}$ (рис. 2в). Ввиду того, что интерметаллическое соединение Al_4Ce плавится инконгруэнтно, сплавы данного разреза при температуре выше 878 K не являются квазибинарными. Это подтверждается данными ДТА анализа, т.е. на термограммах сплавов обнаруживается не менее трех термических эффектов, относящихся соответственно к первичной кристаллизации Al_2Ce и Al_4Ce и эвтектики ($\text{Al}_2\text{Ce}+\text{AlLi}$). Разрез $\text{Al}_4\text{Ce}-\text{AlLi}$ пересекает поле кристаллизации Al_2Ce и AlLi . Таким образом, сплавы данного разреза являются частично квазибинарными. Все сплавы разреза $\text{Al}_4\text{Ce}-\text{AlLi}$ окончательно кристаллизуются при 878K по перитектической реакции $\text{Ж}+\text{Al}_2\text{Ce} \leftrightarrow \beta\text{-Al}_4\text{Ce}+\beta\text{-AlLi}$. При 853 K в сплавах указанного разреза обнаружено эвтектоидное превращение $\beta\text{-Al}_4\text{Ce} \leftrightarrow \alpha\text{-Al}_4\text{Ce} + \gamma\text{-AlLi}$.

Квазибинарные разрезы $\text{Al}_2\text{Ce}-\text{Li}$ и $\text{Al}_2\text{Ce}-\text{AlLi}$ позволили нам триангулировать систему Al-Li-Ce в области Al-Li- Al_2Ce на следующие вторичные самостоятельные системы: Al- Al_2Ce – AlLi и Al_2Ce – AlLi- Li. Схема сингулярной триангуляции системы Al-Li- Al_2Ce пунктиром показана на рис.3.

Вторичная система Al- Al_2Ce -AlLi. В данной вторичной системе обнаружены два четырехфазных равновесия в точках P_1 и E_1 (рис. 3). Четырехфазное равновесие в точке E_1 относится

к эвтектическому превращению $\text{Ж} \leftrightarrow \text{Al} + \text{Al}_4\text{Ce} + \text{AlLi}$, которое протекает при 753 К. Перитектическое превращение $\text{Ж} + \text{Al}_2\text{Ce} \leftrightarrow \text{Al}_4\text{Ce} + \text{AlLi}$ происходит при 878 К.

Вторичная система $\text{Al}_2\text{Ce}-\text{AlLi}-\text{Li}$ ограничена двумя системами эвтектического типа: $\text{Al}_2\text{Ce} - \text{AlLi}$, $\text{AlLi} - \text{Li}$ и системой монотектического типа $\text{Al}_2\text{Ce} - \text{Li}$. Линии моновариантных эвтектических равновесий e_1E_1 , e_2E_2 , e_3P_1 , P_1E_1 , p_1P_1 делят систему на области кристаллизации: алюминия $e_1E_1e_2$, $\text{Al}_4\text{Ce}-e_1E_1P_1p_1$, $\text{AlLi}-e_2E_1P_1e_3P_2p_2$, $\text{Al}_2\text{Ce}-p_1P_1e_3P_1P_3E_2P_4$. Кристаллизация сплавов данной системы заканчивается при 753 К.

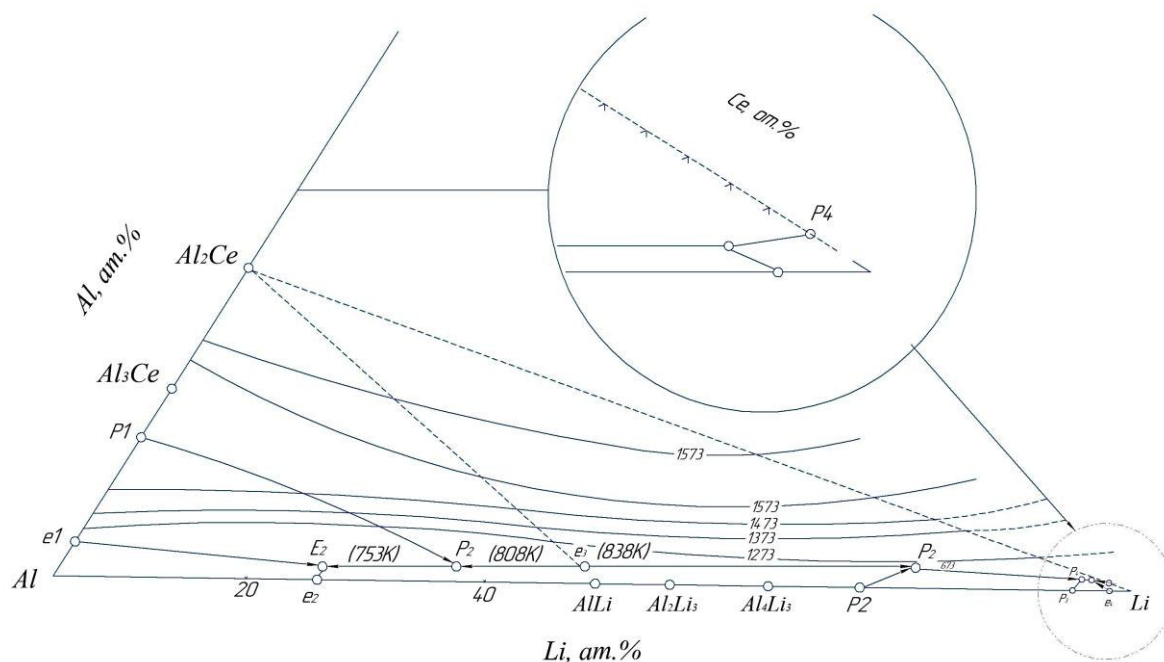


Рисунок 3 – Проекция поверхности ликвидуса системы $\text{Al}-\text{Li}-\text{Al}_2\text{Ce}$
Figure 3 – Projection of the liquidus surface of the $\text{Al}-\text{Li}-\text{Al}_2\text{Ce}$ system

Все эти три моновариантные линии сходятся в невариантной точке E_2 , где наблюдается невариантное четырехфазное эвтектическое равновесие $\text{Ж} \leftrightarrow \text{Al}_2\text{Ce} + \text{AlLi} - \text{Li}$.

Поверхность ликвидуса. На рис. 3 приведена проекция поверхности ликвидуса системы $\text{Al}-\text{Li}-\text{Al}_2\text{Ce}$, которая состоит из 7 полей первичной кристаллизации: алюминиевого твердого раствора, Al_4Ce , Al_2Ce , AlLi , Al_2Li_3 , Al_4Li_9 и твердого раствора на основе лития. Координаты невариантных равновесий приведены в табл. 1.

Таблица 1 – Характеристика невариантных равновесий в сплавах системы $\text{Al}-\text{Li}-\text{Al}_2\text{Ce}$

Table 1 – Characterization of invariant equilibria in $\text{Al}-\text{Li}-\text{Al}_2\text{Ce}$ system alloys

Нонвариантная точка	Равновесие	Концентрация компонентов, ат. %			Температура равновесия, К
		Al	Li	Ce	
e_1	$\text{Ж} \leftrightarrow \text{Al} + \text{Al}_4\text{Ce}$	96,0	-	4,0	913
e_2	$\text{Ж} \leftrightarrow \text{Al} + \text{AlLi}$	96,1	3,9	-	869
e_3	$\text{Ж} \leftrightarrow \text{Al}_2\text{Ce} + \text{AlLi}$	49,5	48,5	2,0	(839) 843
e_4	$\text{Ж} \leftrightarrow \text{Al}_4\text{Li}_9 + \text{Li}$	2,0	98,0	-	450 (405)
p_1	$\text{Ж} + \text{Al}_2\text{Ce} \leftrightarrow \text{Al}_4\text{Ce}$	79,0	-	21,0	1508
p_2	$\text{Ж} + \text{AlLi} \leftrightarrow \text{Al}_2\text{Li}_3$	23,0	77,0	-	793
p_3	$\text{Ж} + \text{Al}_2\text{Li}_3 \leftrightarrow \text{Al}_4\text{Li}_9$	10,0	90,0	-	603

Окончание таблицы 1

p ₄	Ж+ Al ₂ Ce ↔ Li	1,1	97,0	1,9	878 (873)
p ₅	Ж ↔ Ce + β- Li	-	89,9	10,8	383
E ₁	Ж ↔ Al+ AlLi+ Al ₄ Ce	50,5	47,0	2,5	753
E ₂ (P ₄)	Ж+ Al ₂ Ce ↔ Al ₄ Li ₉ + Li	7,3	90,0	2,7	405 (450)
P ₁	Ж+ Al ₂ Ce ↔ Al ₄ Ce+ AlLi	75,7	20,9	3,4	808
P ₂	Ж+ Al ₂ Ce ↔ AlLi+ Al ₂ Li ₃	57,6	38,4	4,0	613
P ₃	Ж+ Al ₂ Ce ↔ Al ₂ Li ₃ + Al ₄ Li ₉	12,2	85,5	2,3	505
P ₄	Ж+ Al ₂ Ce ↔ Al ₄ Li ₉ + Li	7,3	90,0	2,7	465

Заключение

В результате исследования тройной системы Al–Li–Ce и построения её фазовой диаграммы установлено, что тройных соединений в данной системе не обнаружено, а образуются в основном твердые растворы и интерметаллиды в двухфазных и тройных областях.

Квазибинарные сечения Al₂Ce–Li и Al₂Ce–AlLi показали, что они представляют собой перитектическую и эвтектическую системы соответственно. Сечение Al₄Ce–AlLi является частично квазибинарным и характеризуется наличием перитектических и эвтектоидных превращений. Проекция ликвидуса и термический анализ позволили определить основные процессы кристаллизации фаз и выявить невариантные четырехфазные равновесия.

Построение фазовой диаграммы и выявление квазибинарных сечений позволяют прогнозировать фазовые и структурные изменения в алюминиевых сплавах, что имеет практическое значение при разработке легких, прочных и коррозионноустойчивых сплавов для аэрокосмической промышленности.

Таким образом, результаты исследования создают прочную научную основу для проектирования новых алюминиевых сплавов с улучшенными механическими и химическими свойствами.

Рецензент: Бердиев А.Э. — д.т.н., профессор кафедры «Химии и биологии» Российско-Таджикского (Славянского) университета

Литература

1. Воздвиженский, В. М. Прогноз эвтектического и перитектического равновесия в простых двухкомпонентных металлических системах / В. М. Воздвиженский // *Металловедение и физика металлов* (М.Ф.Х.). – 1968. – № 11. – С. 2791–2794.
2. Фридляндер, И. Н. Конструкционные сплавы (серия: Алюминиевые сплавы) / И. Н. Фридляндер (ред.). – М.: Металлургия, 1968.
3. Фридляндер, И. Н. *Металловедение алюминия и его сплавов* / И. Н. Фридляндер (отв. ред.). – М.: Металлургия, 1971. – 384 с.
4. Фридляндер, И. Н. Алюминий-литиевые сплавы. Структура и свойства / И. Н. Фридляндер, К. В. Чуистов, А. Л. Березина, Н. Н. Колобнев. – Киев: Наукова думка, 1992. – 672 с.
5. Воздвиженский, В. М. Прогноз двойных диаграмм состояния / В. М. Воздвиженский. – М.: Металлургия, 1974. – 270 с.
6. Исмонов, Р. Д. Влияние галлия и таллия на микроструктуру и механические свойства алюминиево-бериллиевого сплава / Р. Д. Исмонов, А. М. Сафаров, С. С. Раджабаев, С. Т. Бадурдинов // *Политехнический вестник. Серия: Инженерные исследования*. – 2024. – № 1(65). – С. 65–68. – ISSN 2520-2227.
7. Ганиев, И. Н. Координаты моно- и невариантных равновесий в системе Al–Li–BaAl₄ / И. Н. Ганиев, Х. М. Назаров, Н. И. Ганиева, Б. Б. Абдурахимов, А. Г. Сафаров // *Доклады Академии наук Республики Таджикистан*. – 2015. – Т. 58, № 2. – С. 149–152.

Reference

1. Vozdvizhenskii, V. M. Prediction of Eutectic and Peritectic Equilibrium in Simple Two-Component Metallic Systems / V. M. Vozdvizhenskii // *Metallurgy and Physics of Metals* (M.F.Kh.). – 1968. – No. 11. – pp. 2791–2794.
2. Fridlyander, I. N. Structural Alloys (series: Aluminum Alloys) / I. N. Fridlyander (ed.). – Moscow: Metallurgy, 1968.
3. Fridlyander, I. N. *Metallurgy of Aluminum and Its Alloys* / I. N. Fridlyander (ed.). – Moscow: Metallurgy, 1971. – 384 p.
4. Fridlyander, I. N. Aluminum-Lithium Alloys. Structure and Properties / I. N. Fridlyander, K. V. Chuistov, A. L. Berezina, N. N. Kolobnev. - Kyiv: Naukova Dumka, 1992. - 672 p.

5. Vozdvizhensky, V. M. Forecast of Binary State Diagrams / V. M. Vozdvizhensky. - Moscow: Metallurgy, 1974. - 270 p.
6. Ismonov, R. D. Effect of Gallium and Thallium on the Microstructure and Mechanical Properties of Aluminum-Beryllium Alloy / R. D. Ismonov, A. M. Safarov, S. S. Radzhabaliev, S. T. Badurdinov // Polytechnic Bulletin. Series: Engineering Research. - 2024. - No. 1 (65). - Pp. 65–68. - ISSN 2520-2227.
7. Ganiev, I. N. Coordinates of mono- and nonvariant equilibria in the Al-Li-BaAl₄ system / I. N. Ganiev, H. M. Nazarov, N. I. Ganieva, B. B. Abdurakhimov, A. G. Safarov // Reports of the Academy of Sciences of the Republic of Tajikistan. - 2015. - Vol. 58, No. 2. - P. 149-152.

МАЪЛУМОТ ДАР БОРАИ МУАЛЛИФОН – СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ – INFORMATION ABOUT AUTHORS

TJ	RU	EN
Ганиева Наргис Изатуллоевна н.и.т., дотсенти кафедраи масолахшиносӣ, мошинҳо ва таҷҳизоти металлургӣ	Ганиева Наргис Изатуллоевна к.т.н., доцент кафедры «Материаловедение, металлургические машины и оборудование»	Ganieva Nargis Izatulloевна Candidate of Technical Sciences, Senior teacher of the Department «Materials Science, metallurgical machines and equipment»
Донишгоҳи техникии Тоҷикистон ба номи акад. М.С. Осимӣ	Таджикский технический университет им. акад. М.С. Осими	Tajik Technical University named after acad. M.S. Osimi
E-mail: nargisganieva77@gmail.com		
TJ	RU	EN
Одиназода Хайдар Одина	Одиназода Хайдар Одина	Odinazoda Haidar Odina
Узви вобастаи Академияи миллии илмҳои Тоҷикистон, д.и.т., профессор	член-корр. Национальной академии наук Таджикистан, д.т.н., профессор	Corresponding Member of the National Academy of Sciences of the Republic of Tajikistan, Doctor of Technical Sciences, Professor
Донишгоҳи техникии Тоҷикистон ба номи акад. М.С. Осимӣ	Таджикский технический университет им. акад. М.С. Осими	Tajik Technical University named after acad. M.S. Osimi
E-mail: odhaidar@mail.ru		
TJ	RU	EN
Рачабалиев Сафомудин Сайдалиевич	Раджабалиев Сафомудин Сайдалиевич	Rajabaliev Safomudin Saidalievich
н.и.т., дотсенти кафедраи масолахшиносӣ, мошинҳо ва таҷҳизоти металлургӣ	к.т.н., доцент кафедры «Материаловедение, металлургические машины и оборудование»	Candidate of Technical Sciences, Senior teacher of the Department «Materials Science, metallurgical machines and equipment»
Донишгоҳи техникии Тоҷикистон ба номи акад. М.С. Осимӣ	Таджикский технический университет им. акад. М.С. Осими	Tajik Technical University named after acad. M.S. Osimi
E-mail: safo_02@mail.ru		
TJ	RU	EN
Шамсиддинов Амриддин Ҷамолиддиновч	Шамсиддинов Амриддин Джамолиддиновч	Shamsiddinov Amriddin Jamoliddinovich
н.и.т., дотсент	к.т.н., доцент	Candidate of Technical Sciences
Донишқадаи тибии иҷтимоӣ	Институт социальной медицины	Associate Professor at the Institute of Social Medicine

ОПТИМИЗАЦИЯ ОЧИСТКИ НИКЕЛЕВОГО ЭЛЕКТРОЛИТА ОТ ЖЕЛЕЗА СМЕСЬЮ ОЛЕИНОВОЙ КИСЛОТЫ И ТРИЭТАНОЛАМИНА

¹Д.Л. Илизаров, ¹Н.Б. Кокоева, ²Н.В. Мартюшев

¹Северо-Кавказский горно-металлургический институт (Государственный технологический университет), Владикавказ, Россия

²Национальный исследовательский Томский политехнический университет, Томск, Россия

В работе исследовано влияние температуры на процесс поэтапной экстракции Fe(III) и Zn(II) из хлоридных растворов трибутилфосфатом. Установлено, что изменение температурного режима оказывает существенное влияние на коэффициенты распределения металлов, степень их извлечения и селективность разделения компонентов. Эксперименты проводились на модельных хлоридных растворах, содержащих Fe(III) и Zn(II), при температурах от 20 до 65°C. В качестве экстрагента использовали трибутилфосфат концентрацией 50 об. %, разбавленный керосином. Показано, что повышение температуры до 45–55°C способствует увеличению степени извлечения Fe(III) до 96–98% после трех стадий экстракции при сравнительно низкой соэкстракции Zn(II). Максимальные значения коэффициента разделения Fe/Zn составили 28–31. Установлено, что дальнейшее повышение температуры приводит к росту извлечения Zn(II), ухудшению разделения фаз и снижению селективности процесса. Исследовано распределение компонентов по стадиям экстракции и показано, что основная часть Fe(III) извлекается уже на первой стадии процесса. Полученные результаты могут быть использованы при разработке технологий очистки многокомпонентных гидрометаллургических растворов и никелевых электролитов от соединений железа без применения дополнительных осадительных операций.

Ключевые слова: Fe(III); Zn(II); хлоридные растворы; экстракция; трибутилфосфат; температура.

ОПТИМИЗАЦИЯ ОЧИСТКИ НИКЕЛЕВОГО ЭЛЕКТРОЛИТА ОТ ЖЕЛЕЗА СМЕСЬЮ ОЛЕИНОВОЙ КИСЛОТЫ И ТРИЭТАНОЛАМИНА

Д.Л. Илизаров, Н.Б. Кокоева, Н.В. Мартюшев

¹Донишқадаи кӯҳӣ-металлургии Қафқози Шимолӣ (Донишгоҳи давлатии технологӣ), ш. Владикавказ, Россия

²Донишгоҳи политехникии Томск, ш. Томск, Россия

Дар кор таъсири ҳарорат ба раванди экстраксияи зина ба зинаи Fe(III) ва Zn(II) аз маҳлулҳои хлоридӣ бо истифодаи трибутилфосфат таҳқиқ карда шудааст. Муайян гардид, ки тағйирёбии речаи ҳарорат ба коэффисиентҳои тақсимшавии металлҳо, дараҷаи истихроҷи онҳо ва селективнокӣи ҷудокунии компонентҳо таъсири назаррас мерасонад. Таҷрибаҳо дар маҳлулҳои модели хлоридӣ, ки дорои Fe(III) ва Zn(II) мебошанд, дар ҳарорати аз 20 то 65°C гузаронида шуданд. Ҳамчун экстрагент трибутилфосфати дорои консентратсияи 50 ҳаҷм.% истифода шуд. Нишон дода шуд, ки баланд шудани ҳарорат то 45–55°C боиси зиёд шудани дараҷаи истихроҷи Fe(III) то 96–98% пас аз се марҳилаи экстраксия мегардад, дар ҳоле ки ҳамзамон истихроҷи Zn(II) нисбатан паст боқӣ мемонад. Қиматҳои максималии коэффисиенти ҷудокунии Fe/Zn ба 28–31 расиданд. Муайян гардид, ки баландшавии минбаъдаи ҳарорат боиси зиёд шудани истихроҷи Zn(II), бад шудани ҷудошавии фазаҳо ва паст шудани селективнокӣи раванд мегардад. Натиҷаҳои бадастомада метавонанд ҳангоми таҳияи технологияҳои тозакунии маҳлулҳои бисёркомпонентии гидрометаллургӣ ва электролитҳои никелӣ аз пайвастиҳои оҳан истифода шаванд.

Калидвожаҳо: Fe(III); Zn(II); маҳлулҳои хлоридӣ; экстраксия; трибутилфосфат; ҳарорат.

OPTIMIZATION OF NICKEL ELECTROLYTE PURIFICATION FROM IRON USING A MIXTURE OF OLEIC ACID AND TRIETHANOLAMINE

D.L. Ilizarov, N.B. Kokoeva, N.V. Martyushev

¹North Caucasus Mining and Metallurgy Institute (State Technological University), Vladikavkaz, Russia

²National Research Tomsk Polytechnic University, Tomsk, Russia

The paper investigates the influence of temperature on the stage-by-stage extraction of Fe(III) and Zn(II) from chloride solutions using tributyl phosphate. It was established that changes in temperature significantly affect the distribution coefficients of metals, extraction efficiency, and separation selectivity. Experiments were carried out using model chloride solutions containing Fe(III) and Zn(II) at temperatures ranging from 20 to 65°C. Tributyl phosphate with a concentration of 50 vol.% diluted in kerosene was used as the extractant. It was shown that increasing the temperature to 45–55°C promotes an increase in Fe(III) extraction up to 96–98% after three extraction stages while maintaining relatively low Zn(II) co-extraction. The maximum Fe/Zn separation coefficient reached 28–31. It was established that further temperature increase leads to higher Zn(II) extraction, deterioration of phase separation, and reduction of process selectivity. The distribution of components over the extraction stages was investigated, showing that the main part of Fe(III) is extracted already at the first stage of the process. The obtained results can be used in the development of technologies for purification of multicomponent hydrometallurgical solutions and nickel electrolytes from iron compounds without additional precipitation operations.

Keywords: Fe(III); Zn(II); chloride solutions; extraction; tributyl phosphate; temperature.

Введение

Современное развитие цветной металлургии сопровождается постоянным усложнением состава перерабатываемого сырья и увеличением объёмов многокомпонентных растворов, образующихся в гидрометаллургических процессах [1, 2]. Особенно это характерно для никелевого производства, где при электрохимической переработке сырья в электролитах наряду с никелем накапливаются железо, медь и другие примеси, оказывающие существенное влияние на стабильность технологического процесса и качество конечного продукта [3]. Присутствие железа в никелевых электролитах приводит к ухудшению условий электроосаждения никеля, повышению расхода реагентов и снижению срока службы оборудования [4]. Кроме того, железо активно участвует в гидролитических процессах и может вызывать образование труднофильтруемых осадков, осложняющих эксплуатацию гидрометаллургических схем [5].

Традиционно очистка никелевых электролитов от железа осуществляется осадительными методами, основанными на окислении Fe(II) до Fe(III) с последующей нейтрализацией раствора [6–8]. Несмотря на широкое промышленное применение подобных технологий, они обладают рядом существенных недостатков. Основными из них являются высокий расход реагентов, образование больших объёмов шламов и совместное осаждение цветных металлов, прежде всего никеля и меди [9]. В результате возникают дополнительные потери ценных компонентов и необходимость дальнейшей переработки образующихся отходов. В условиях ужесточения экологических требований и роста стоимости сырья подобные процессы становятся все менее эффективными и экономически оправданными.

В последние годы значительное внимание уделяется экстракционным методам очистки гидрометаллургических растворов [10]. Использование жидкостной экстракции позволяет проводить селективное извлечение компонентов без образования значительных количеств твёрдых отходов, а также обеспечивает возможность регенерации органической фазы и возврата реагентов в технологический цикл [11]. Особенно перспективным направлением считается применение смесевых экстракционных систем на основе органических кислот и аминов, обладающих высокой способностью к образованию комплексных соединений с ионами металлов [12, 13].

Одной из наиболее перспективных экстракционных систем в последние годы считается смесь олеиновой кислоты и триэаноламина. Подобная композиция позволяет достаточно гибко регулировать селективность извлечения металлов за счёт изменения кислотности раствора, температуры процесса и фазового соотношения O:W. В ряде работ показано, что органические кислоты способны эффективно взаимодействовать с ионами Fe(III) и Cu(II), образуя сравнительно устойчивые экстрагируемые комплексы. Никель при этом, в большинстве случаев сохраняется преимущественно в водной фазе. Именно это делает подобные системы особенно интересными для очистки никелевых электролитов с содержанием Ni 45–70 г/дм³, железа 1,5–6,0 г/дм³ и меди порядка 0,2–1,5 г/дм³.

Однако механизмы взаимодействия компонентов экстракционной системы с многокомпонентными растворами до конца все еще изучены недостаточно. В литературе встречаются достаточно противоречивые данные по оптимальным значениям pH, температуры и концентрации экстрагентов. Например в одних исследованиях максимальное извлечение Fe наблюдалось уже при pH 1,8–2,0, тогда как в других работах наиболее эффективной считалась область 2,2–2,5.

Следует также учитывать, что для промышленных никелевых электролитов характерны значительные колебания состава растворов. Содержание железа, меди и других примесей может изменяться в достаточно широких пределах в зависимости от состава исходного сырья и режима работы гидрометаллургического передела. Кроме того изменение температуры и кислотности раствора позволяет в определенных пределах управлять селективностью процесса и изменять характер извлечения примесей из никелевого электролита.

Материалы и методы исследования

В качестве объектов исследования использовали модельные и промышленные гидрометаллургические растворы, содержащие ионы Fe(III), Cu(II), Ni(II), Zn(II), Mn(II) и Co(II).

Основное внимание уделялось никелевым электролитам, образующимся при электрорафинировании никеля, а также многокомпонентным хлоридным и сульфатным растворам металлургического происхождения. Содержание никеля в исходных электролитах составляло 45–70 г/дм³, железа 1,5–6,0 г/дм³, меди 0,2–1,5 г/дм³ при кислотности 25–60 г/дм³ H₂SO₄. Для приготовления модельных растворов использовали соли FeCl₃·6H₂O, FeSO₄·7H₂O, CuSO₄·5H₂O, NiSO₄·7H₂O и ZnCl₂ квалификации «ч.д.а.». Растворы готовили на дистиллированной воде по ГОСТ 6709–72 с последующей корректировкой кислотности растворами HCl и H₂SO₄ концентрацией 1–6 моль/дм³.

Экстракционные исследования проводили в лабораторных делительных воронках объёмом 250 и 500 см³, а также в стеклянных термостатируемых реакторах марки РВД-2 с механическими мешалками IKA Eurostar 20 digital. Скорость перемешивания составляла 300–600 об/мин. В качестве органической фазы применяли смесь олеиновой кислоты и триэаноламина в керосине марки ТС-1. Концентрация олеиновой кислоты изменялась в пределах 0,15–0,45 моль/дм³, триэаноламина — 0,10–0,35 моль/дм³. В отдельных опытах дополнительно использовали трибутилфосфат марки «х.ч.» концентрацией 50–100 %. Соотношение органической и водной фаз изменяли от О:В = 1:1 до 1:4. Продолжительность контакта фаз составляла 1–15 мин, однако в большинстве экспериментов время перемешивания принимали равным 5 мин, поскольку именно за этот период достигалось до 90–95 % извлечения Fe.

Температуру процесса поддерживали в диапазоне 20–60 °С с использованием ультратермостата LOIP LT-211. Контроль температуры осуществляли цифровыми датчиками Testo 110 с точностью ±0,5 °С. Кислотность растворов регулировали растворами NaOH и H₂SO₄, а значение pH контролировали pH-метром HANNA HI-2211 с комбинированным стеклянным электродом. Исследования проводили при pH 1,5–3,5, поскольку в данном интервале наблюдалось наиболее выраженное изменение селективности экстракции железа и меди относительно никеля. После завершения контакта фаз растворы разделяли отстаиванием в течение 3–10 мин. В ряде опытов использовали постадийную подачу экстрагента порциями по 20–30 % от общего объёма органической фазы.

Содержание металлов в водной и органической фазах определяли методами атомно-абсорбционной спектроскопии на спектрометре «Квант-2А», фотоколориметрии на КФК-3-01 и комплексонометрического титрования. Анализ содержания железа проводили с использованием сульфосалицилового метода, меди — йодометрическим методом, никеля — комплексонометрически с мурексидом. Погрешность определения концентраций не превышала 3 %. Все опыты выполняли не менее трёх раз, а результаты рассчитывали как среднее значение серии параллельных экспериментов.

Для оценки эффективности процесса рассчитывали степень извлечения металлов, коэффициенты распределения и коэффициенты разделения Fe/Ni и Fe/Cu. Обработка экспериментальных данных осуществлялась методами математической статистики и регрессионного анализа с использованием программ OriginPro 2021 и Microsoft Excel. На основании полученных результатов строили зависимости степени извлечения металлов от температуры, кислотности и фазового соотношения, что позволило определить оптимальные параметры очистки никелевого электролита от железа и меди.

Результаты исследования

На первом этапе исследовали влияние кислотности раствора на степень извлечения Fe и потери никеля. Установлено, что при pH ниже 1,8 экстракция железа протекает сравнительно слабо, а степень его извлечения обычно не превышает 45–55%. Например при pH 1,5 извлечение Fe составляло около 48,6%, а коэффициент разделения Fe/Ni оставался на уровне 9. Потери никеля при этом были небольшими — порядка 0,4–0,7%, однако сама эффективность очистки электролита оставалась недостаточной.

Это связано с высокой устойчивостью гидратированных форм железа в водной фазе и недостаточно активным взаимодействием Fe(III) с компонентами органической фазы. Кроме того при низкой кислотности система оставалась более инертной, а распределение металлов между фазами происходило медленнее. Время достижения равновесия иногда превышало 8–10 мин.

При увеличении pH до 2,2–2,5 наблюдалось резкое увеличение степени извлечения железа. Уже при pH 2,0 извлечение Fe достигало 81–82%, а при pH 2,2–2,5 возрастало до 94–97%. Одновременно коэффициент разделения Fe/Ni увеличивался с 18 до 24–31. Это хороший показатель. Потери никеля при этом оставались сравнительно низкими и обычно не превышали 1,5–2%. Так, при pH 2,5 степень извлечения железа составляла 97,1%, извлечение меди — около 31%, а потери никеля находились на уровне 2%.

Полученные результаты показывают, что изменение кислотности раствора оказывает достаточно сложное влияние на характер распределения металлов между органической и водной фазами. В области pH 2,2–2,5 наблюдаются наиболее благоприятные условия для селективного извлечения железа. Вероятно это связано с тем, что именно в данном интервале кислотности создаются оптимальные условия для образования сравнительно устойчивых экстрагируемых комплексов Fe(III) с компонентами органической фазы. При этом никель в значительной степени сохраняется в водном растворе. Благодаря этому обеспечивается достаточно высокая селективность процесса даже в присутствии меди, цинка, кобальта и других примесей, характерных для промышленных никелевых электролитов.

Следует отметить, что при pH 2,2–2,5 система работала наиболее устойчиво. Разделение фаз происходило сравнительно быстро, а образование промежуточных межфазных прослоек практически не наблюдалось. В большинстве опытов время полного разделения фаз не превышало 3–4 мин. Кроме того органическая фаза после экстракции сохраняла достаточно хорошую прозрачность и не проявляла заметных признаков деградации даже после нескольких последовательных циклов работы.

Эксперименты показали, что повышение кислотности выше оптимального диапазона приводит к изменению характера экстракционного процесса. Увеличение pH выше 3,0 не обеспечивает роста степени извлечения железа. При pH 2,4–2,5 извлечение Fe составляло 96–97%, при pH 3,2–3,5 оно немного снижалось. Одновременно начинали возрастать потери никеля и увеличивалось извлечение меди. В результате дальнейшее повышение кислотности становилось уже нецелесообразным с точки зрения селективной очистки никелевого электролита.

Таким образом проведенные исследования позволяют считать область pH 2,2–2,5 наиболее благоприятной для проведения процесса экстракционной очистки. Именно в данном интервале достигается оптимальное сочетание высокой степени извлечения железа, сравнительно небольших потерь никеля и удовлетворительных гидродинамических характеристик системы. При этом коэффициент разделения Fe/Ni достигал 24–31, что свидетельствует о достаточно высокой эффективности исследуемой экстракционной смеси даже при переработке многокомпонентных гидрометаллургических растворов.

Таблица 1 – Влияние кислотности раствора на степень извлечения железа и потери никеля при экстракционной очистке никелевого электролита

Table 1 – Effect of solution acidity on the degree of iron extraction and nickel loss during solvent extraction purification of nickel electrolyte

pH раствора	Температура, °C	O:W	Извлечение Fe, %	Извлечение Cu, %	Потери Ni, %	Коэффициент разделения Fe/Ni
1,5	40	1:2	48,6	8,2	0,4	9
1,8	40	1:2	63,4	12,5	0,7	13
2,0	40	1:2	81,7	18,9	1,1	18
2,2	40	1:2	94,2	24,3	1,5	24
2,4	45	1:2	96,8	29,7	1,8	29
2,5	45	1:2	97,1	31,4	2,0	31
2,7	45	1:2	96,4	45,8	3,1	22
2,9	50	1:2	95,7	67,3	4,5	17
3,2	50	1:2	93,5	78,2	5,8	12
3,5	55	1:2	91,8	84,6	6,5	9

Таким образом область pH 2,2–2,5 можно считать наиболее благоприятной для проведения экстракционной очистки никелевых электролитов. Именно в этом диапазоне достигается оптимальное сочетание высокой степени извлечения Fe(III), сравнительно низких потерь Ni и

удовлетворительных гидродинамических характеристик системы. При этом коэффициент разделения Fe/Ni достигал 24–31, что свидетельствует о достаточно высокой эффективности выбранной экстракционной системы даже для многокомпонентных гидрометаллургических растворов.

Существенное влияние на процесс оказывала температура. Это проявлялось достаточно отчетливо уже на первых стадиях экспериментов. Исследования показали, что при повышении температуры от 20 до 40–45°C скорость экстракции железа заметно возрастает, а степень извлечения Fe увеличивается в среднем на 18–25%. Так, если при 20°C извлечение железа обычно составляло около 68–74%, то уже при 35–40°C оно достигало 89–95%, а при 45°C повышалось до 96–97%. При этом потери никеля оставались сравнительно небольшими — порядка 1,5–2%. Это было важно.

одновременно с увеличением температуры наблюдалось и достаточно заметное изменение кинетики распределения компонентов между фазами. Уже на первых стадиях экспериментов было установлено, что при нагреве раствора скорость перехода Fe(III) в органическую фазу существенно возрастает. Если при температуре около 20–25°C равновесное распределение компонентов обычно устанавливалось лишь через 8–10 мин после начала перемешивания, то при 40–45°C основная часть железа переходила в органическую фазу уже в течение первых нескольких минут контакта. В большинстве опытов при данных температурах около 70–75% Fe извлекалось уже за первые 1–2 мин перемешивания. Это хороший показатель.

Для меди и никеля подобный эффект проявлялся значительно слабее. Скорость их перехода в органическую фазу возрастала не так интенсивно. В результате именно в области температур 40–45°C создавались наиболее благоприятные условия для селективного извлечения железа из никелевого электролита. При этом коэффициент разделения Fe/Ni в ряде опытов достигал 24–31, а степень извлечения железа стабильно сохранялась на уровне 95–97%.

Следует отметить, что изменение температурного режима одновременно влияло и на характер поведения самой органической фазы. При умеренном нагреве система становилась менее вязкой, улучшался массоперенос между фазами и ускорялось образование экстрагируемых комплексных соединений железа.

Проведенные авторами исследования, позволяют считать область температур 40–45°C наиболее благоприятной для селективной экстракционной очистки никелевого электролита от железа. Именно в данном интервале достигается оптимальное сочетание высокой степени извлечения Fe, сравнительно низких потерь Ni и удовлетворительных гидродинамических характеристик системы. Кроме того в этих условиях сохраняется достаточно высокая устойчивость органической фазы и обеспечивается сравнительно быстрое разделение слоев после завершения процесса экстракции.

Таблица 2 – Влияние температуры и фазового соотношения на эффективность экстракционной очистки никелевого электролита

Table 2 – Effect of temperature and phase ratio on the efficiency of solvent extraction purification of nickel electrolyte

Температура, °C	O:W	Время контакта, мин	Извлечение Fe, %	Извлечение Cu, %	Потери Ni, %	Время разделения фаз, мин
20	1:1	10	68,4	11,3	0,8	2
25	1:1	10	74,6	13,7	1,0	2
30	1:2	7	82,1	18,2	1,2	3
35	1:2	5	89,4	22,8	1,4	3
40	1:2	5	95,3	27,4	1,6	4
45	1:2	5	97,0	31,5	1,9	4
50	1:3	5	96,2	56,7	3,8	5
55	1:3	5	94,8	73,9	5,1	6
60	1:4	5	92,7	81,4	6,3	8

Подобное изменение селективности связано с температурным влиянием на устойчивость комплексных соединений металлов и изменение распределения компонентов между фазами. Для железа повышение температуры способствует интенсификации образования экстрагируемых комплексов, тогда как для никеля и меди температурный эффект выражен слабее при умеренном нагреве, но резко возрастает при температурах выше 50 °С. Таким образом, область 40–45 °С можно рассматривать как оптимальную для селективного извлечения железа из никелевого электролита (Рисунок 1).

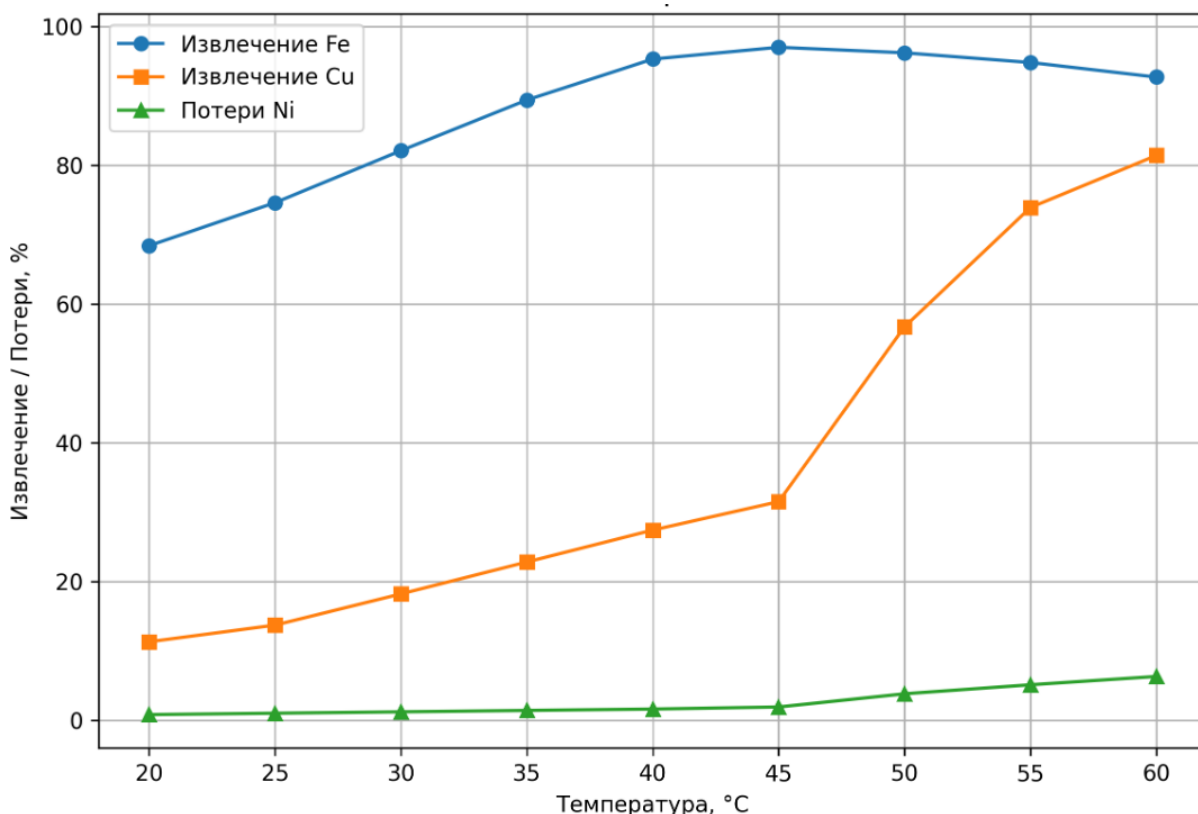


Рисунок 1 – Влияние температуры на степень извлечения Fe, Cu и потери Ni при экстракционной очистке никелевого электролита

Figure 1 – Effect of temperature on the degree of Fe and Cu extraction and Ni loss during solvent extraction purification of nickel electrolyte

При исследовании влияния фазового соотношения O:W оказалось, что рост объёма органической фазы действительно улучшает извлечение железа, но одновременно увеличивает и потери никеля с медью. При O:W = 1:1 извлечение Fe держалось примерно на уровне 82–88 %, а уже при 1:2 возрастало до 95–97 %. Дальше рост был уже незначительным. При соотношениях 1:3 и 1:4 железо извлекалось лишь немного лучше, зато расход экстрагента резко возрастал, и экономические показатели становились хуже.

Поэтому оптимальным вариантом выбрали O:W = 1:2. Этого оказалось достаточно.

Интересно, что сама кинетика процесса шла очень быстро. Уже через 1–2 мин в органическую фазу переходило около 70–75 % Fe, а через 5 мин степень извлечения доходила до 90–95 %. После этого процесс почти стабилизировался, и увеличение времени контакта практически не влияло на распределение железа между фазами.

Для никеля и меди картина была совсем другой, процесс шел медленнее. Даже при длительном контакте их извлечение оставалось заметно ниже, что в определенной степени и обеспечивало

селективность системы. При этом при увеличении времени контакта более 6–7 мин начинали возрастать потери Ni, особенно при повышенной температуре 45–50°C.

В целом система показала достаточно устойчивую работу. Особенно в диапазоне O:W = 1:2, где удавалось получать высокую степень очистки электролита при сравнительно небольших потерях никеля и умеренном расходе органической фазы.

Это объясняется различиями в устойчивости и скорости образования экстрагируемых комплексных форм металлов. Полученные данные позволяют предположить возможность сокращения времени контакта фаз при промышленной реализации процесса и уменьшения объема экстракционного оборудования.

При исследовании состава органической фазы было установлено, что наиболее устойчивые и селективные результаты достигаются при содержании олеиновой кислоты порядка 0,25–0,35 моль/дм³ и триэтаноламина около 0,15–0,25 моль/дм³. Именно в этом диапазоне система работала наиболее стабильно. При меньших концентрациях экстрагентов степень извлечения железа заметно снижалась, поскольку в органической фазе оказывалось недостаточно активных центров для связывания Fe(III). Например при содержании олеиновой кислоты около 0,15 моль/дм³ извлечение железа обычно не превышало 68–74%, даже при температуре 40–45°C и времени контакта фаз около 5 мин.

Дальнейшие исследования были направлены на изучение влияния состава органической фазы на устойчивость работы экстракционной системы и селективность разделения компонентов. Полученные результаты показали, что наиболее стабильная работа системы наблюдается при содержании олеиновой кислоты порядка 0,25–0,35 моль/дм³ и концентрации триэтаноламина около 0,15–0,25 моль/дм³. Именно в этой области достигалось наиболее благоприятное сочетание степени извлечения железа, устойчивости органической фазы и сравнительно низких потерь никеля.

При концентрации олеиновой кислоты ниже 0,15–0,18 моль/дм³ извлечение железа заметно падало. Но повышение концентрации триэтаноламина более 0,30–0,35 моль/дм³ приводил к извлечению меди. В некоторых сериях опытов извлечение Cu увеличивалось до 55–60%, хотя при нормальном составе органической фазы составляло примерно 24–32%. Одновременно росли и потери никеля. Из-за этого коэффициент разделения Fe/Ni снижался почти в 2 раза.

Кинетика процесса тоже менялась. При оптимальном составе до 90–95% Fe(III) переходило в органическую фазу буквально за первые 3–5 мин контакта. Но при высокой вязкости системы процесс шел медленнее, поскольку ухудшался перенос вещества между фазами.

Интересные результаты были получены при изменении pH и температуры. При pH 2,8–3,0 и 50–55°C система начинала активно извлекать уже не только железо, но и медь. Извлечение Cu доходило до 75–85%, при этом Fe сохранялось на уровне 94–96%. Вероятно это связано с изменением устойчивости комплексных соединений в органической фазе.

Одновременно усиливалась и экстракция никеля. Особенно сильно это проявлялось при O:W = 1:3–1:4 и температурах выше 50°C. Потери Ni в этих условиях возрастали до 4–6,5%. Коэффициент разделения Fe/Ni снижался с 29–31 до примерно 12–17, что уже ухудшало селективность процесса.

При pH выше 3,2 система работала нестабильно. Появлялось помутнение, образовывались труднофильтруемые соединения железа. Иногда между фазами возникали промежуточные пленки, из-за которых разделение растворов сильно затягивалось.

В результате было установлено, что смесь олеиновой кислоты и триэтаноламина позволяет достаточно гибко управлять процессом очистки никелевого электролита. При изменении температуры от 45 до 55°C и pH 2,7–3,2 происходило своеобразное перераспределение селективности системы между Fe, Cu и Ni. Это выглядело как температурно-кислотная инверсия селективности.

На основе опытов была предложена схема очистки никелевого электролита. Раствор предварительно корректировали до pH 2,2–2,5 и нагревали до 40–45°C. После этого электролит поступал в смесительно-отстойные аппараты. Контакт фаз занимал примерно 3–5 мин. За это время извлекалось до 90–95% Fe(III). Далее органическую фазу регенерировали раствором серной кислоты и возвращали обратно в цикл.

Эксперименты показали, что органическая фаза сохраняет стабильность примерно 8–10 циклов без заметного ухудшения характеристик. При содержании Fe 1,5–6 г/дм³ и Cu 0,2–1,5 г/дм³ извлечение железа обычно оставалось в пределах 92–97%. Это достаточно высокий показатель для подобных систем.

Предложенная схема позволяла уменьшить содержание железа в никелевом электролите без дополнительных осадительных операций. При этом потери никеля снижались примерно в 1,5–2 раза, уменьшалось образование железосодержащих шламов и снижалась нагрузка на гидрометаллургическое оборудование.

Обсуждения

Полученные результаты показывают, что использование смеси олеиновой кислоты и триэтаноламина позволяет эффективно осуществлять селективную очистку никелевых электролитов от железа без применения дополнительных осадительных операций. В ходе исследований установлено, что наибольшее влияние на процесс оказывают кислотность раствора и температура экстракции. Именно изменение этих параметров определяет распределение Fe, Cu и Ni между водной и органической фазами и в значительной степени влияет на селективность процесса.

Установлено, что оптимальная область работы экстракционной системы соответствует pH 2,2–2,5 и температуре 40–45 °С. В данных условиях достигается высокая степень извлечения железа — до 95–97 % — при сравнительно низких потерях никеля, не превышающих 1,5–2 %. Полученные значения коэффициента разделения Fe/Ni свидетельствуют о достаточно высокой селективности исследуемой системы и хорошо согласуются с современными представлениями о поведении комплексных соединений железа в кислых гидрометаллургических растворах.

Исследования также показали, что основная часть железа извлекается уже в течение первых минут контакта фаз. Так, в первые 1–2 мин в органическую фазу переходило до 70–75% Fe(III), а через 3–5 мин степень извлечения железа обычно достигала 90–95%. Дальнейшее увеличение времени контакта фаз уже практически не влияло на распределение железа между фазами. Это указывает на достаточно высокую скорость образования экстрагируемых комплексов Fe(III) с компонентами органической фазы и позволяет рассматривать возможность сокращения продолжительности процесса при промышленной реализации технологии. Кроме того уменьшение времени контакта фаз позволяет не только снизить энергозатраты на перемешивание, но и уменьшить общий объем экстракционного оборудования. Это имеет достаточно большое значение при промышленной реализации процесса, особенно при переработке значительных объемов никелевых электролитов. Полученные результаты показывают, что основная часть Fe(III) извлекается уже на первых стадиях контакта растворов, тогда как дальнейшее увеличение продолжительности процесса уже практически не оказывает заметного влияния на распределение железа между фазами. Подобный характер кинетики свидетельствует о высокой скорости образования экстрагируемых комплексов железа в органической фазе.

Было установлено, что слишком большое количество органической фазы уже почти не улучшает очистку электролита. При O:W выше 1:2 извлечение Fe росло совсем незначительно, обычно всего на 1–3 %, зато потери никеля и расход экстрагента увеличивались уже довольно сильно. Особенно это проявлялось при соотношениях 1:3 и 1:4, где система начинала работать менее стабильно.

Гидродинамика тоже ухудшалась. Это было заметно.

После экстракции время разделения слоев увеличивалось иногда до 6–8 мин. В отдельных опытах появлялись устойчивые межфазные прослойки и легкое помутнение органической фазы, особенно при температурах выше 50 °С и высоком содержании меди порядка 1,2–1,5 г/дм³. Из-за этого работа системы становилась менее устойчивой, а расход реагентов возрастал.

Полученные результаты в целом хорошо совпадают с современными представлениями о работе экстракционных систем на основе аминов и органических кислот. При pH 2,2–2,5 и температурах около 40–45 °С преимущественно извлекалось железо, а никель в основном оставался в водной фазе. Но уже при 50–55 °С и pH 2,8–3,2 начинала усиливаться совместная экстракция Cu и Ni.

Селективность постепенно ухудшалась. Особенно при нагреве.

Вероятно это связано с изменением устойчивости комплексных соединений металлов в органической фазе. Для Fe умеренный нагрев ускорял образование комплексов и улучшал массоперенос. Но дальнейшее повышение температуры уже приводило к росту извлечения меди и никеля, из-за чего очистка становилась менее селективной. Кроме того возрастал и расход экстрагента, поскольку часть органической фазы растворялась в водном растворе.

Исследования показали, что система очень чувствительна к pH. При pH ниже 1,8 извлечение Fe оставалось недостаточным, а при 2,2–2,5 достигались наиболее хорошие результаты. В этой

области потери Ni обычно не превышали 1,5–2 %. Однако дальнейшее увеличение pH вызывало рост совместной экстракции меди и ухудшение разделения фаз.

Интересно, что в системе наблюдалось своеобразное изменение селективности. При температурах 45–55 °С и pH 2,7–3,2 экстракция начинала активно извлекать уже не только железо, но и медь. Такой режим может быть полезен для комплексной очистки растворов, хотя селективность по никелю при этом снижалась уже достаточно сильно.

По сравнению с обычными осадительными методами экстракционная схема имела несколько заметных преимуществ. Уменьшалось образование железосодержащих шламов, снижался расход нейтрализующих реагентов, а потери никеля были в 1,5–2 раза ниже.

Выводы

1. Определено, что наибольшее влияние на эффективность процесса оказывают кислотность раствора, температура экстракции и фазовое соотношение органической и водной фаз.

2. Показано, что оптимальные условия очистки никелевого электролита достигаются при pH 2,2–2,5, температуре 40–45 °С и фазовом соотношении O:W = 1:2.

3. В оптимальных условиях степень извлечения железа составляет 95–97 %, при этом потери никеля не превышают 1,5–2 %, а коэффициент разделения Fe/Ni достигает 24–31.

4. Установлено, что повышение температуры выше 50 °С приводит к увеличению совместной экстракции меди и никеля, ухудшению селективности процесса и росту расхода органической фазы.

5. Показано, что основная часть Fe(III) извлекается уже в течение первых 3–5 мин контакта фаз. При этом за первые 1–2 мин в органическую фазу переходило до 70–75% железа, а через 5 мин степень извлечения Fe достигала 90–95%. Дальнейшее увеличение времени контакта практически не влияло на распределение железа между фазами. Это позволяет сократить продолжительность процесса и уменьшить количество экстракционных стадий, что имеет достаточно большое значение при промышленной реализации технологии. Установлено, что увеличение объема органической фазы выше оптимального значения O:W = 1:2 уже не обеспечивает существенного повышения степени извлечения железа. Так, при переходе от соотношения 1:2 к 1:3 и 1:4 извлечение Fe возрастало незначительно, однако одновременно увеличивались потери никеля, расход экстрагента и ухудшались экономические показатели процесса. Кроме того при высоком содержании органической фазы наблюдалось ухудшение разделения фаз и увеличение времени их расслоения.

6. Предложена технологическая схема экстракционной очистки никелевого электролита, включающая стадии подготовки раствора, экстракции, разделения фаз и регенерации органической фазы. Установлено, что при pH 2,2–2,5 и температуре 40–45 °С обеспечивается снижение содержания железа до нормативных значений без применения дополнительных осадительных операций. При этом существенно уменьшается образование металлургических шламов и снижаются потери никеля.

Полученные результаты подтверждают перспективность использования экстракционных систем на основе олеиновой кислоты и триэтанолamina для совершенствования гидрометаллургических процессов производства никеля. Показано, что изменение температуры, кислотности и фазового соотношения позволяет достаточно эффективно управлять селективностью процесса и разрабатывать более ресурсосберегающие и экологичные технологии переработки многокомпонентных растворов цветной металлургии.

Рецензент: Туркин В.А. — д.т.н., профессор Государственного морского университета имени адмирала Ф.Ф. Ушакова

Литература

1. Kongolo, K. Cobalt and Zinc Recovery from Copper Sulphate Solution by Solvent Extraction / K. Kongolo, M. D. Mwema, A. N. Banza, E. Gock // Minerals Engineering. – 2003. – Vol. 16, No. 12. – P. 1371–1374. – DOI: 10.1016/j.mineng.2003.09.001.
2. Улахович, Н. А. Экстракция как метод разделения и концентрирования / Н. А. Улахович // Соросовский образовательный журнал. – 1999. – № 6. – С. 39–46.
3. Гулевич, А. Л. Экстракционные методы разделения и концентрирования веществ: пособие для студентов хим. фак. спец. 1-31 05 01 «Химия (по направлениям)» / А. Л. Гулевич, С. М. Лещев, Е. М. Рахманько. – Минск: БГУ, 2009. – 153 с.
4. Воропанова, Л. А. Экстракция ионов цинка (II) из водных растворов трибутилфосфатом / Л. А. Воропанова, Н. Б. Кокоева // Цветная металлургия. – 2015. – № 5. – С. 53–59.
5. Снурников, А. П. Комплексное использование минеральных ресурсов в цветной металлургии / А. П. Снурников. – М.: Металлургия, 1986. – 384 с.
6. Набойченко, С. С. Автоклавная гидрометаллургия цветных металлов / С. С. Набойченко, Л. П. Ни, Я. М. Шнеерсон, А. В. Чугаев. – Екатеринбург: Изд-во УГТУ-УПИ, 2002. – 940 с.

7. Kruger, J. Соображения по проблеме железа при гидрометаллургическом извлечении цинка / J. Kruger, R. Pullenberg // *Erzmetall.* – 1981. – № 7–8. – С. 380–387.
8. Jiang, K. The Process Improvement Researches for Zinc Hydrometallurgy / K. Jiang, H. Wang, B. Zhang // *World of Metallurgy – ERZMETALL.* – 2015. – Vol. 68, No. 3. – P. 181–185.
9. Пат. 2571743 РФ, МПК C22B 3/38. Экстракция ионов цинка (II) из водных растворов трибутилфосфатом / Л. А. Воропанова, Н. Б. Кокоева. – № 2014136669/05; заявл. 09.09.2014; опубл. 20.12.2015.
10. Воропанова, Л. А. Селективная экстракция железа и цинка из водных растворов трибутилфосфатом / Л. А. Воропанова, Н. Б. Кокоева // *Цветная металлургия.* – 2015. – № 12. – С. 30–35.
11. Пат. 2572927 РФ, МПК C22B 15/00, C22B 3/16, C25C 1/12. Экстракция ионов железа (III) из водных растворов трибутилфосфатом / Л. А. Воропанова, Н. Б. Кокоева. – № 2014136589/02; заявл. 09.09.2014; опубл. 20.01.2016.
12. Воропанова, Л. А. Экстракция железа и цинка из водных растворов трибутилфосфатом / Л. А. Воропанова, Н. Б. Кокоева. – Деп. ВИНТИ № 354-B2014 от 30.12.2014. – 32 с.
13. Lum, K. H. The Modelling of $ZnCl_2$ Extraction and HCl Co-Extraction by TBP Diluted in ShellSol 2046 / K. H. Lum, G. W. Stevens, J. M. Perera, S. E. Kentish // *Hydrometallurgy.* – 2013. – Vol. 133. – P. 64–74.
14. Воропанова, Л. А. Экстракция ионов железа (III) из водных растворов трибутилфосфатом / Л. А. Воропанова, Н. Б. Кокоева // *Записки Горного института.* – 2015. – Т. 213. – С. 24–30.
15. Wang, Y. Hydrometallurgical Process for Recovery of Cobalt from Zinc Plant Residue / Y. Wang, C. Zhou // *Hydrometallurgy.* – 2002. – Vol. 63, No. 3. – P. 225–234. – DOI: 10.1016/S0304-386X(01)00213-4.
16. Вольдман, Г. М. Теория гидрометаллургических процессов / Г. М. Вольдман, А. Н. Зеликман. – М.: Металлургия, 1993. – С. 303–307.
17. Fleitlikh, I. Yu. Zinc Extraction from Sulphate-Chloride Solutions with Mixtures of a Trialkyl Amine and Organic Acids / I. Yu. Fleitlikh, G. L. Pashkov, N. A. Grigorieva, O. A. Logutenko // *Hydrometallurgy.* – 2014. – Vol. 149. – P. 110–117.
18. Zhang, K. Recovery of Gallium from Leach Solutions of Zinc Refinery Residues by Stepwise Solvent Extraction with N235 and Cyanex 272 / K. Zhang, L. Qiu, J. Tao, X. Zhong, Z. Lin, R. Wang, Z. Liu // *Hydrometallurgy.* – 2021. – Vol. 205. – Art. no. 105722. – DOI: 10.1016/j.hydromet.2021.105722.

Reference

1. Kongolo, K. Cobalt and Zinc Recovery from Copper Sulphate Solution by Solvent Extraction / K. Kongolo, M. D. Mwema, A. N. Banza, E. Gock // *Minerals Engineering.* – 2003. – Vol. 16, No. 12. – P. 1371–1374. – DOI: 10.1016/j.mineng.2003.09.001.
1. Ulakhovich, N. A. Extraction as a Method of Separation and Concentration / N. A. Ulakhovich // *Soros Educational Journal.* – 1999. – No. 6. – P. 39–46.
2. Gulevich, A. L. Extraction Methods of Separation and Concentration of Substances: A Manual for Students of the Chem. Faculty of Specialization. 1-31 05 01 “Chemistry (in areas)” / A. L. Gulevich, S. M. Leshchev, E. M. Rakhmanko. – Minsk: BSU, 2009. – 153 p.
3. Voropanova, L. A. Extraction of zinc (II) ions from aqueous solutions with tributyl phosphate / L. A. Voropanova, N. B. Kokoeva // *Non-ferrous metallurgy.* – 2015. – No. 5. – P. 53–59.
4. Snurnikov, A. P. Integrated use of mineral resources in non-ferrous metallurgy / A. P. Snurnikov. – M.: Metallurgy, 1986. – 384 p.
5. Naboychenko, S. S. Autoclave hydrometallurgy of non-ferrous metals / S. S. Naboychenko, L. P. Ni, Ya. M. Shneerson, A. V. Chugaev. – Ekaterinburg: Publishing house of USTU-UI, 2002. – 940 p.
6. Kruger, J. Considerations on the problem of iron in hydrometallurgical extraction of zinc / J. Kruger, R. Pullenberg // *Erzmetall.* – 1981. – No. 7-8. – P. 380-387.
7. Jiang, K. The Process Improvement Researches for Zinc Hydrometallurgy / K. Jiang, H. Wang, B. Zhang // *World of Metallurgy – ERZMETALL.* – 2015. – Vol. 68, No. 3. – P. 181–185.
8. Patent 2571743 RF, IPC C22B 3/38. Extraction of zinc (II) ions from aqueous solutions with tributyl phosphate / L. A. Voropanova, N. B. Kokoeva. – No. 2014136669/05; declared 09.09.2014; published 20.12.2015.
9. Voropanova, L. A. Selective extraction of iron and zinc from aqueous solutions with tributyl phosphate / L. A. Voropanova, N. B. Kokoeva // *Non-ferrous Metallurgy.* – 2015. – No. 12. – P. 30–35.
10. Patent 2572927 RF, IPC C22B 15/00, C22B 3/16, C25C 1/12. Extraction of iron (III) ions from aqueous solutions with tributyl phosphate / L. A. Voropanova, N. B. Kokoeva. – No. 2014136589/02; declared 09.09.2014; published 20.01.2016.
11. Voropanova, L. A. Extraction of iron and zinc from aqueous solutions with tributyl phosphate / L. A. Voropanova, N. B. Kokoeva. – Dep. VINITI No. 354-B2014 dated 30.12.2014. – 32 p.
12. Lum, K. H. The Modelling of $ZnCl_2$ Extraction and HCl Co-Extraction by TBP Diluted in ShellSol 2046 / K. H. Lum, G. W. Stevens, J. M. Perera, S. E. Kentish // *Hydrometallurgy.* – 2013. – Vol. 133. – P. 64-74.
13. Voropanova, L. A. Extraction of Iron (III) Ions from Aqueous Solutions with Tributyl Phosphate / L. A. Voropanova, N. B. Kokoeva // *Notes of the Mining Institute.* – 2015. – Vol. 213. – P. 24-30.
14. Wang, Y. Hydrometallurgical Process for Recovery of Cobalt from Zinc Plant Residue / Y. Wang, C. Zhou // *Hydrometallurgy.* – 2002. – Vol. 63, No. 3. – P. 225–234. – DOI: 10.1016/S0304-386X(01)00213-4.
15. Vol'dman, G. M. Theory of Hydrometallurgical Processes / G. M. Vol'dman, A. N. Zelikman. – Moscow: Metallurgy, 1993. – P. 303–307.

16. Fleitlikh, I. Yu. Zinc Extraction from Sulphate-Chloride Solutions with Mixtures of a Trialkyl Amine and Organic Acids / I. Yu. Fleitlikh, G. L. Pashkov, N. A. Grigorieva, O. A. Logutenko // Hydrometallurgy. – 2014. – Vol.149. – P. 110–117.

17. Zhang, K. Recovery of Gallium from Leach Solutions of Zinc Refinery Residues by Stepwise Solvent Extraction with N235 and Cyanex 272 / K. Zhang, L. Qiu, J. Tao, X. Zhong, Z. Lin, R. Wang, Z. Liu // Hydrometallurgy. – 2021. – Vol.205. – Art. no.105722. – DOI: 10.1016/j.hydromet.2021.105722.

18. Loan, M. Defining the Paragoethite Process for Iron Removal in Zinc Hydrometallurgy / M. Loan, O. M. G. Newman, R. M. G. Cooper, J. B. Parrow, G. M. Parkinson // Hydrometallurgy. – 2006. – Vol. 81, No. 2. – Pp. 104–129.

МАЪЛУМОТ ДАР БОРАИ МУАЛЛИФОН – СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ – INFORMATION ABOUT AUTHORS

TJ	RU	EN
Илизаров Даниэль Леонидович	Илизаров Даниэль Леонидович	Ilizarov Daniel Leonidovich
Аспирант	Аспирант	Graduate student
Донишкадаи кӯҳӣ-металлургии Кафқози Шимоли (Донишгоҳи давлатии технологӣ)	Северо-Кавказский горно- металлургический институт (Государственный технологический университет)	North Caucasian Institute of Mining and Metallurgy (State Technological University)
E-mail: ilizarov177@gmail.com		
TJ	RU	EN
Кокоева Наталья Борисовна	Кокоева Наталья Борисовна	Kokoeva Natalia Borisovna
Номзади илмҳои техники, дотсент	к.т.н., доцент	Candidate of Technical Sciences, Associate Professor
Донишкадаи кӯҳӣ-металлургии Кафқози Шимоли (Донишгоҳи давлатии технологӣ)	Северо-Кавказский горно- металлургический институт (Государственный технологический университет)	North Caucasian Institute of Mining and Metallurgy (State Technological University)
E-mail: kokoeva.natali.borisovna@yandex.ru		
TJ	RU	EN
Мартюшев Никита Владимирович	Мартюшев Никита Владимирович	Martyushev Nikita Vladimirovich
Номзади илмҳои техники, дотсент	к.т.н., доцент	Candidate of Technical Sciences, Associate Professor
Донишгоҳи политехникии Томск, Федератсияи Россия, ш. Томск	Томский политехнический университет, Российская Федерация, г. Томск	Tomsk Polytechnic University, Russian Federation, Tomsk
E-mail: martjushev@tpu.ru		

ВЛИЯНИЕ ОСАЖДЕНИЯ Cu НА ШЕРОХОВАТОСТЬ ПОВЕРХНОСТИ И КОЭФФИЦИЕНТ ТРЕНИЯ Al_2O_3

¹М.У. Хайдаров, ²Н.Н. Черенда, ¹Э.Э. Окилов

¹Физико-технический институт имени С.У. Умарова НАН Таджикистана, Душанбе, Таджикистан

²Белорусский государственный университет, Минск, Беларусь

Проанализировано влияние шероховатости и волнистости поверхности на коэффициент трения: установлено, что сглаживание микрорельефа снижает деформационную составляющую силы трения. Определён оптимальный режим напыления - расстояние 5,5 см и 3 импульса: он обеспечивает минимальную шероховатость за счёт оплавления выступов и заполнения впадин медью. Установлено, что при всех режимах напыления волнистость поверхности снижается по сравнению с исходным образцом. Сформирована методика оценки параметров: коэффициент трения измеряли на трибометре ТАУ-1М, шероховатость - на профилометре MarSurf SD 26. Показано, что при оптимальном режиме коэффициент трения достигает ~0,025; подтверждена корреляция топографии поверхности с трибологическим поведением материала. Обоснована перспективность применения ЭКПП для модификации Al_2O_3 - такие композиты могут использоваться в подшипниках и скользящих электрических контактах.

Ключевые слова: эрозионные плазменные потоки, шероховатость, электрод, волнистость, высота неровностей профиля, керамика, оксид алюминия, трение, износ, скольжение, осаждение (напыление).

ТАЪСИРИ ТАҲШИНИ Cu БА НОҲАМВОРИИ САТҲ ВА КОЭФФИЦИЕНТИ СОИШИ Al_2O_3

М.У. Ҳайдаров, Н.Н. Черенда, Э.Э. Окилов

¹Институти физикаю техникаи ба номи С.У. Умарови Академияи миллии илмҳои Тоҷикистон, Душанбе,

Ҷумҳурии Тоҷикистон

²Донишгоҳи давлатии Беларус, ш. Минск, Ҷумҳурии Беларус

Таъсири ноҳамворӣ ва мавҷнокӣи сатҳ ба коэффисиенти соиш таҳлил карда шуд. Муайян гардид, ки ҳамворшавии микрорелефи сатҳ боиси кам шудани қузьи деформатсионии қувваи соиш мегардад. Речаи оптималии рӯйпушкунӣ муайян карда шуд, ки масофаи 5,5 см ва 3 импульсро дар бар мегирад. Ин реча ба туфайли ғудохта шудани барҷастагиҳои сатҳ ва пур гардидани фурурафтагиҳо бо мис, ҳадди ақали ноҳамвории сатҳро таъмин менамояд. Муайян карда шуд, ки дар ҳамаи речаҳои рӯйпушкунӣ мавҷнокӣи сатҳ нисбат ба намунаи ибтидоӣ коҳиш меёбад. Методикаи баҳодиҳии параметрҳои таҳия гардид: коэффисиенти соиш бо истифода аз трибометри ТАУ-1М, ноҳамвории сатҳ бошад, тавассути профилометри MarSurf SD 26 чен карда шуд. Нишон дода шуд, ки дар речаи оптималӣ коэффисиенти соиш то тақрибан 0,025 паст мешавад ва вобастагии байни топографияи сатҳ ва хусусиятҳои трибологии мавод тасдиқ гардид. Дурнамои истифодаи усули ЭКПП барои модификасияи композитҳои Al_2O_3 аз ҷиҳати илмӣ асоснок карда шуд. Чунин композитҳо метавонанд дар истеҳсоли милдонҳо ва контактҳои лағжандаи барқӣ истифода шаванд.

Калидвожаҳо: ҷараёнҳои плазмавии эрозӣ, ноҳамворӣ, электрод, мавҷнокӣ, баландии нобаробарии профил, сафол, алюминий, соиш, фарсудашавӣ, лағжиш, рӯйпушкунӣ.

Effect of Cu deposition on the surface roughness and friction coefficient of Al_2O_3

M.U. Khaidarov, N.N. Cherenda, E.E. Okilov

¹S.U. Umarov Physical-Technical Institute of the National Academy of Sciences of Tajikistan, Dushanbe, Tajikistan

²Belarusian State University, Minsk, Belarus

The influence of surface roughness and waviness on the coefficient of friction was analyzed. It was found that smoothing the surface microrelief reduces the deformation component of the friction force. The optimal coating deposition mode was determined to be a spraying distance of 5.5 cm and 3 pulses. This mode provides the minimum surface roughness due to the remelting of surface asperities and the filling of surface depressions with copper. It was also established that, under all coating deposition modes, the surface waviness decreases compared to the initial sample. A methodology for evaluating the parameters was developed. The coefficient of friction was measured using a TAU-1M tribometer, while the surface roughness was determined with a MarSurf SD 26 profilometer. The results showed that, under the optimal deposition mode, the coefficient of friction reached approximately 0.025. A clear correlation between the surface topography and the tribological behavior of the material was confirmed. The prospects of applying electrocontact pulse coating deposition (EPCD) for the modification of Al_2O_3 were substantiated. Such composites can be effectively used in bearings and sliding electrical contacts.

Keywords: erosive plasma flows, roughness, electrode, waviness, profile unevenness height, ceramics, alumina, friction, wear, sliding, Deposition.

Введение

Одним из актуальных направлений современного материаловедения является разработка новых материалов с высокой износостойкостью и низким коэффициентом трения [1-10].

Представляет интерес и разработка новых способов модификации трибологических свойств широко распространенных материалов, в частности оксида алюминия. Оксид алюминия используется в различных областях благодаря его химической стойкости, высокой температуре плавления и твердости [2]. Этот материал может применяться для создания подшипников в различного вида генераторах [3]. В то же время для расширения использования оксида алюминия в трибологических приложениях необходимо решить задачи по уменьшению коэффициента трения и увеличению износостойкости.

Эти задачи могут быть решены несколькими путями. Один из них основан на трансформации химического состава поверхности материала, в частности формирование композитов оксида алюминия с металлами.

Например, композиты с медной матрицей обеспечивают сочетание высокой электропроводности и износостойкости, что позволяет их использовать в скользящих электрических контактах и других электротехнических приложениях [1]. Также широко распространенным способом уменьшения коэффициента трения и увеличения износостойкости поверхности является нанесение покрытий соответствующего целевого назначения [4-11].

К другим способам относится изменение качества поверхности, т.е. шероховатости и волнистости. Известно, что шероховатость поверхности оказывает существенное влияние на работу трущихся деталей:

- шероховатость поверхности влияет на площадь фактического контакта между сопряженными поверхностями и, кроме того, может меняться в процессе трения за счет износа выступов профиля;
- коррозия металла возникает и распространяется быстрее на грубо обработанных поверхностях;
- шероховатость влияет на точность измерения деталей и т.д. [7].

Экспериментальное оборудование и методы измерения

Объектом исследований являлись образцы поликристаллического оксида алюминия (Al_2O_3), полученные компактированием и последующим спеканием порошка. Покрытия меди на поверхности образцов оксида алюминия были сформированы с помощью эрозионных компрессионных плазменных потоков (ЭКПП), создаваемых миниатюрным плазменным ускорителем с медными электродами [8]. Схема разрядного устройства представлена на рисунке 1. Эксперимент проводился в вакуумной камере с давлением остаточного воздуха 1,3 Па. Питание разрядного устройства осуществлялось с помощью конденсаторной батареи емкостью 400 мкФ. Образцы размещались в камере на различном расстоянии от разрядной системы ($d = 5-6$ см). Длительность импульса составляла ~ 100 мкс. Количество импульсов варьировалось от 3 до 6 см.

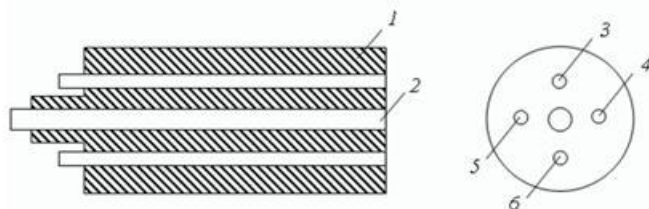


Рисунок 1 – Схема разрядного устройства миниатюрного эрозионного плазменного ускорителя: 1) изолирующий блок, 2) катод (внутренний электрод), 3)–6) стержни внешнего электрода (анод) [9]

Figure 1 – Schematic diagram of the discharge device of a miniature erosion plasma accelerator: 1) insulating block; 2) cathode (inner electrode); 3–6) rods of the outer electrode (anode) [9]

Ранее проведенные исследования показали, что при разряде конденсаторной батареи на систему электродов и формирование компрессионного плазменного потока происходит эрозия поверхности электродов в условиях пониженного давления в камере [8]. Эрозия металлических электродов приводит к появлению металлической составляющей в газовом плазменном потоке. При окончании действия импульса и распаде плазменного потока металлическая компонента начинает

конденсироваться у поверхности мишени в металлсодержащие кластеры в результате адиабатического охлаждения, которые осаждаются на поверхности образца [8].

В данной работе коэффициент трения измерялся на трибометре ТАУ-1М, схема которого представлена на рисунке 2. Испытания проводились в условиях сухого трения при возвратно-поступательном движении сферического индентора, изготовленного из твердого сплава ВК8 (состав: 92% WC, 8% Co; твердость 37 ГПа) в течение 0,5ч. Скорость движения индентора составляла 0,004 м/с, нагрузка на индентор – 20 г.

Сила трения F выражается через коэффициент трения μ следующей формулой:

$$\mu = \frac{F_{\text{тр}}}{P} = \frac{F_{\text{тр.мол}} + F_{\text{тр.деф}}}{P} = \frac{\tau_0}{P_r} + \beta + k \sqrt{\frac{h}{r}} \quad (1)$$

где P – нагрузка на индентор, $F_{\text{тр.мол}}$, $F_{\text{тр.деф}}$ – молекулярная и деформационная составляющие силы трения, действующие на отдельную неровность, внедрившуюся на глубину h и движущуюся по деформируемому телу, τ_0 – напряжение среза молекулярной связи, P_r – фактическое давление на контакте, β – коэффициент упрочнения молекулярных связей под воздействием нормальных сжимающих напряжений. $k = 0,19\alpha$ – при упругом контакте (α – коэффициент гистерезисных потерь материала).

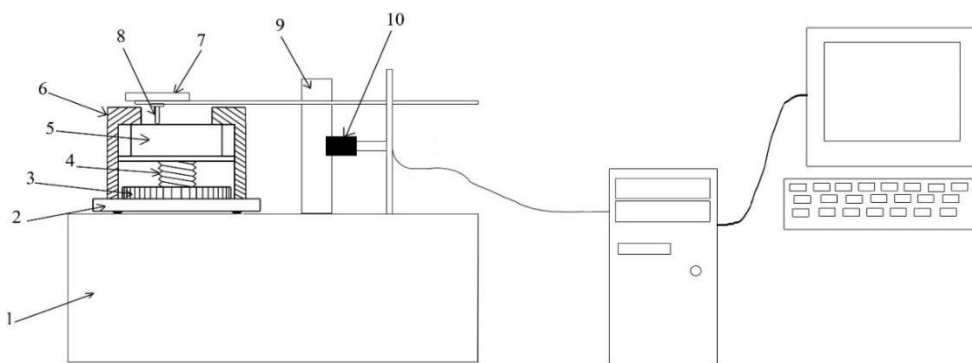


Рисунок 2 – Схема установка трибометрия ТАУ-1М: Центральным элементом является стойка (1), в которой размещен электромотор. Этот мотор приводит в движение каретку (2), к которой посредством винта (4) крепится колесо (3) для зажима образца (5). Образец удерживается в фиксированном положении с помощью держателей (6). На образец прикладывается нагрузка (7). Для измерения силы трения используется закругленная игла (8), соединенная с гибкой пластиной (9). Изменение положения пластины, вызванное силой трения, регистрируется электромагнитным датчиком смещения (10) [7]

Figure 2 – Schematic diagram of the TAU-1M tribometer. The central component is the support column (1), which houses the electric motor. The motor drives the carriage (2), to which the sample clamping wheel (3) is attached by means of a screw (4). The specimen (5) is securely fixed using holders (6). A normal load (7) is applied to the specimen. The friction force is measured using a rounded stylus (8) connected to a flexible plate (9). The displacement of the plate, caused by the friction force, is recorded by an electromagnetic displacement sensor (10) [7]

В настоящем исследовании для количественной оценки параметров шероховатости поверхности применялся профилометр MarSurf SD 26, принципиальная схема которого иллюстрирована на рисунке 3. Расчет показателей шероховатости, основанный на данных инструментального анализа профиля поверхности, осуществлялся с использованием приведенных ниже формул для трех ключевых параметров

$$R_a = \frac{1}{l} \int_0^l |y(x)| dx \approx \frac{1}{n} \sum_{i=1}^5 y_i, \quad (2)$$

где R_a – высота y_i i -го пика;

$$R_{\max} = R_p + R_v, \quad (3)$$

где R_p – максимальная высота пика, R_v – максимальная глубина впадины на всей рабочей длине образца;

$$R_z = \frac{1}{5} (\sum_{i=1}^5 R_{pi} + \sum_{i=1}^5 R_{vi}), \quad (4)$$

где R_{pi} – i -ый наивысший пик, R_{vi} – i -ая самая глубокая впадина.

Управление профилометром и обработка данных осуществляется программным комплексом MarSurf XR1. [7]

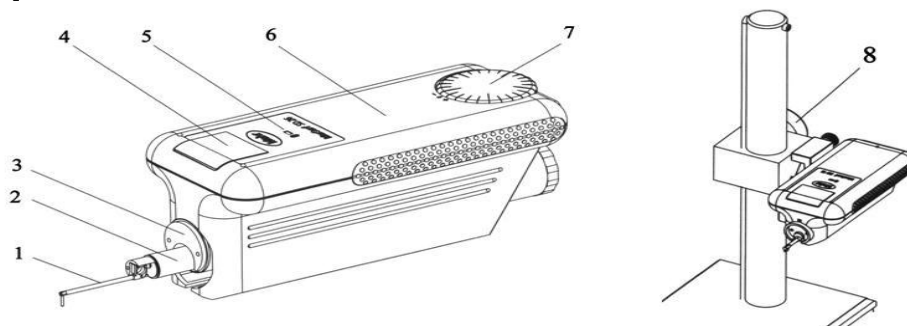
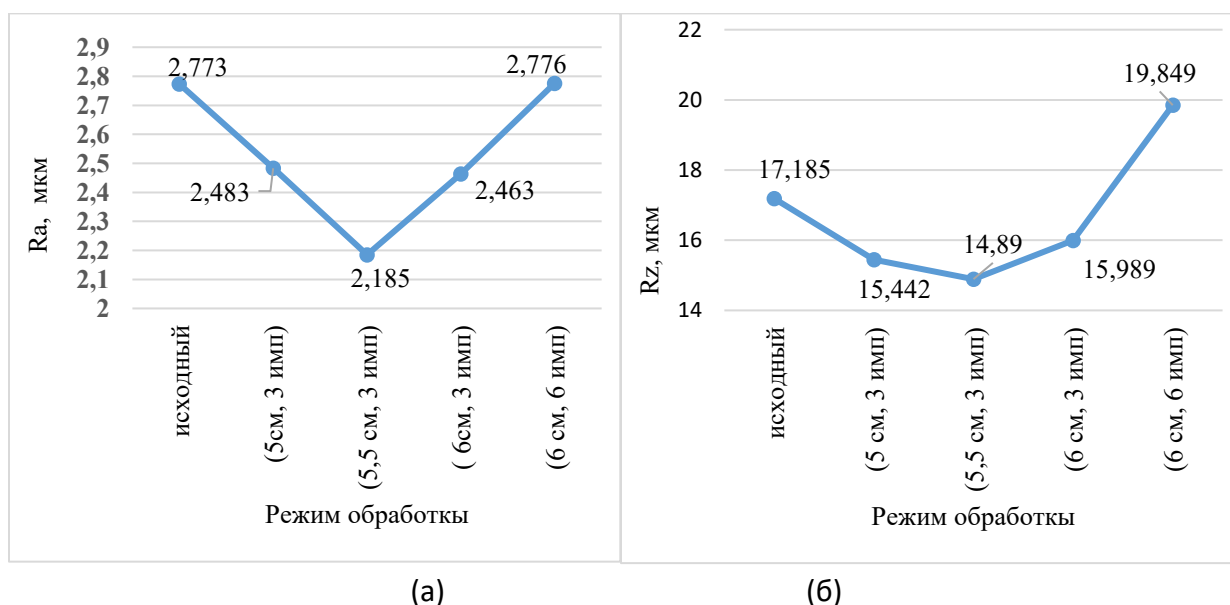


Рисунок 3 – Схема профилометра MarSurf SD 26: 1) консоль щупа; 2) датчик, интегрированный в механизм подачи и оснащенный магнитным фиксатором для консоли щупа; 3) механизм подачи; 4) кнопка запуска (Старт); 5) индикатор статуса Bluetooth-соединения; 6) корпус прибора; 7) маховик для регулировки угла наклона; и 8) рукоятка для настройки высоты [7]

Figure 3 – Schematic diagram of the MarSurf SD 26 profilometer: 1) stylus arm; 2) sensor integrated into the feed mechanism and equipped with a magnetic holder for the stylus arm; 3) feed mechanism; 4) Start button; 5) Bluetooth connection status indicator; 6) instrument housing; 7) handwheel for tilt angle adjustment; and 8) height adjustment handle [7]

Экспериментальные результаты и их обсуждение

На рисунке 4 представлены результаты измерения параметров шероховатости (R_a , R_z , R_{max}) и волнистости (W_a) поверхности образцов с медным покрытием, осажденным при различных режимах. Как видно из рисунка, зависимость параметров шероховатости от расстояния между образцом и системой электродов имеет нелинейный характер. Минимальное значение шероховатости было зарегистрировано при следующем режиме: расстояние -5,5 см, число импульсов -3. Можно предположить, что такое поведение связано с влиянием следующих факторов. Во-первых, уменьшение расстояния ведет к увеличению энергии, поглощенной поверхностным слоем образца, и соответственно росту количества оплавленных выступов поверхности и ее сглаживанию. Во-вторых, напыление слоя меди также может приводить к сглаживанию поверхности за счет заполнения впадин на поверхности. Последний эффект усиливается с уменьшением расстояния. При возрастании расстояния (свыше 5,5 см) влияние этих факторов уменьшается, и показатели шероховатости поверхности образцов с покрытием приближаются к показателям образцов до плазменного воздействия. Необходимо подчеркнуть, что волнистость поверхности всех образцов с напыленным покрытием оказалась меньше, чем у исходного образца вне зависимости от режима напыления.



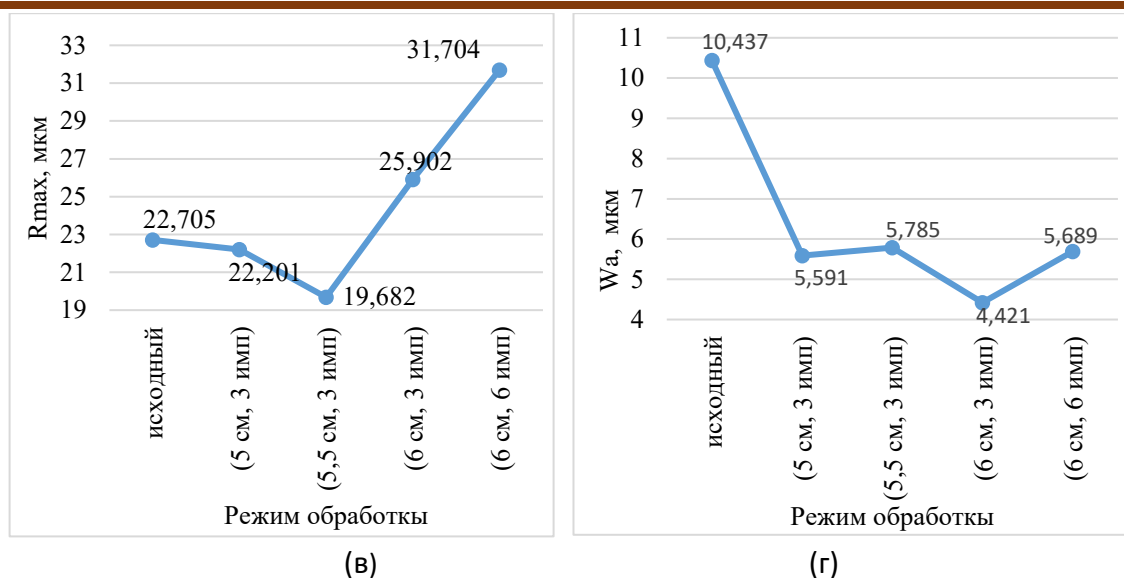


Рисунок 4 – Результаты измерения параметров шероховатости поверхности и волнистости образцов, покрытых медью, полученных в различных условиях осаждения. В частности, отображены значения шероховатости R_a (а), R_z (б), R_{max} (в) и волнистости W_a (г)

Figure 4 – Results of measurements of the surface roughness and waviness parameters of copper-coated samples obtained under different deposition conditions. In particular, the values of roughness parameters R_a (a), R_z (b), R_{max} (c) and waviness parameter W_a (d) are presented.

Рисунок 5 демонстрирует, как коэффициент трения изменяется в зависимости от пройденного индентором расстояния для исходного образца оксида и образцов с медным покрытием, нанесенным в разных условиях. Наилучшие результаты (самый низкий коэффициент трения) были достигнуты при осаждении на расстоянии 5.5 см от подложки с использованием 3 импульсов. Этот же режим обеспечил минимальную шероховатость поверхности. Предполагается, что наблюдаемое снижение коэффициента трения при нанесении медного покрытия является следствием уменьшения микрорельефа поверхности. Это, в свою очередь, приводит к снижению деформационного компонента силы трения.

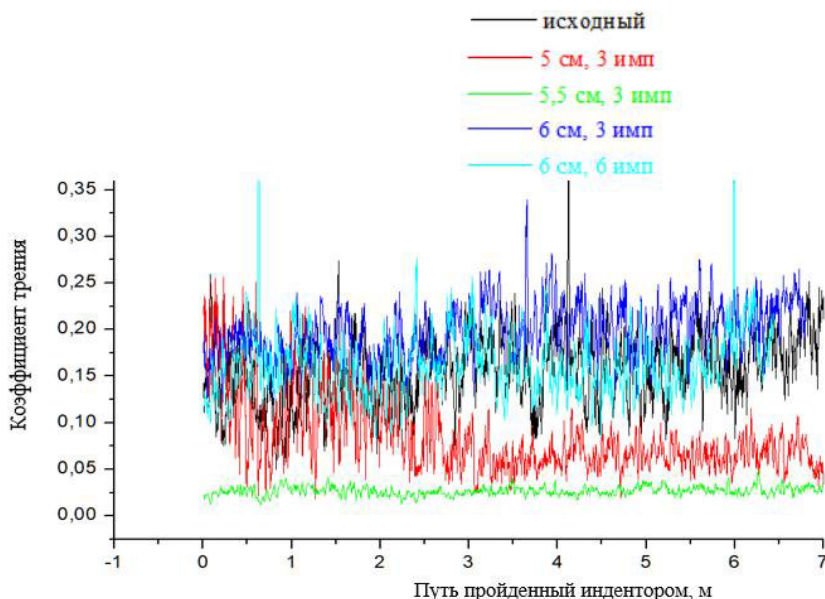


Рисунок 5 – Проведен сравнительный анализ зависимостей коэффициента трения от пройденного индентором пути для исходного образца и образцов с медным покрытием, полученным в различных условиях

Figure 5 – Comparative analysis of the dependences of the coefficient of friction on the sliding distance of the indenter was performed for the initial sample and copper-coated samples obtained under different deposition conditions.

Заключение

Данная работа демонстрирует, что осаждение медных покрытий является эффективным методом для модификации трибологических свойств оксида алюминия. Было показано, что шероховатость и волнистость поверхности изменяются в зависимости от режима осаждения, что, в свою очередь, сказывается на коэффициенте трения. Оптимальный режим для достижения минимальной шероховатости был определен как 5.5 см, 3 импульса. При этом для всех режимов воздействия наблюдалось уменьшение волнистости по сравнению с исходным образцом. Образец, осажденный в режиме 5.5 см, 3 импульса, показал наименьший коэффициент трения (около 0.025), что подтверждает корреляцию между шероховатостью поверхности и коэффициентом трения.

Благодарность

Выражаю искреннюю признательность и благодарность сотрудникам кафедры физики твердого тела и нанотехнологий Белорусского государственного университета за помощь в проведении исследований, а также В.М. Асташинскому, заведующему отделением физики плазмы и плазменных технологий, и сотрудникам лаборатории физики плазменных ускорителей Института тепло- и массообмена имени А.В. Лыкова Национальной академии наук Беларуси за оказанную помощь в обработке образцов эрозионными плазменными потоками.

Рецензент: Юнусов М.М. — к.т.н., доцент кафедры «Эксплуатация автомобильного транспорта» ПГЛУ имени академика М.С. Осими

Литература

1. Behera, A. Tribological Study of $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{TiO}_2/\text{Cu}$ Composite by Using Pin-on-Disc Wear Machine / A. Behera, S. C. Chaine, A. Behera // *Elixir Chem. Phys.* – 2013. – Vol. 61. – P. 16672–16674.
2. Wear-Resistant Alumina Coatings [Электронный ресурс]. – URL: http://www.substech.com/dokuwiki/doku.php?id=wear_resistant_alumina_coatings (дата обращения: 25.03.2026).
3. Zhao, X. Wear Behaviour of $\text{Al}_2\text{O}_3\text{-TiCN}$ Composite Ceramic Sliding Against Pure Al, Fe and Stainless Steel / X. Zhao, J. Liu, B. Zhu, Z. Luo, H. Miao // *Ceramics International.* – 1997. – Vol. 23, No. 3. – P. 197–202.
4. Heimann, R. B. [Название статьи не указано] / R. B. Heimann, H. D. Lehmann // *Recent Patents on Materials Science.* – 2008. – Vol. 1. – P. 41.
5. Fauchais, P. [Название статьи не указано] / P. Fauchais, A. Vardelle, B. Dussoubs // *Journal of Thermal Spray Technology.* – 2001. – Vol. 10, No. 1. – P. 44.
6. Vuoristo, P. [Название статьи не указано] / P. Vuoristo, P. Nylén // *Journal of Thermal Spray Technology.* – 2007. – Vol. 16, No. 4. – P. 466.
7. Черенда, Н. Н. Методы механических испытаний материалов: пособие / Н. Н. Черенда, Н. И. Поляк, В. И. Шиманский. – Минск: БГУ, 2017. – 135 с.
8. Astashynski, V. M. Generation of Erosion Compression Plasma Flows in a Miniature Plasma Accelerator and Their Capability for Formation of Thin Nanostructured Coating / V. M. Astashynski, H. M. Dzahnidze, E. A. Kostyukevich, A. M. Kuzmitski, P. N. Shoronov, V. I. Shymanski, V. V. Uglov // *High Temperature Material Processes.* – 2020. – Vol. 24, No. 2. – P. 99–107.
9. Углов, В. В. Модификация материалов компрессионными плазменными потоками / В. В. Углов, Н. Н. Черенда, В. М. Анищик, В. М. Асташинский, Н. Т. Квасов. – Минск: БГУ, 2011. – 252 с.
10. Юнусов, М. Ю. Комплексная алюминиевая смазка для трибоузлов современных машин и механизмов / М. Ю. Юнусов, М. С. Холикзода, Ш. Шарифов, О. С. Ниезов // *Политехнический вестник. Серия: Инженерные исследования.* – 2025. – № 4(72). – С. 97–101. – DOI: 10.65599/UJEU4043. – EDN: GOFZKV.
11. Бодурбеков, Ф. С. Изменение качества моторного масла — индикатор текущего состояния автомобильных двигателей / Ф. С. Бодурбеков, М. Ю. Юнусов, Б. Ж. Мажитов, Н. Б. Сахибов // *Peasant.* – 2018. – № 1. – С. 38–40. – EDN: STQAJE.

Reference

1. Behera, A. Tribological Study of $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{TiO}_2/\text{Cu}$ Composite by Using Pin-on-Disc Wear Machine / A. Behera, S. C. Chaine, A. Behera // *Elixir Chem. Phys.* – 2013. – Vol. 61. – P. 16672–16674.
2. Wear-Resistant Alumina Coatings [Electronic resource]. – URL: http://www.substech.com/dokuwiki/doku.php?id=wear_resistant_alumina_coatings (access date: 03/25/2026).
3. Zhao, X. Wear Behavior of $\text{Al}_2\text{O}_3\text{-TiCN}$ Composite Ceramic Sliding Against Pure Al, Fe and Stainless Steel / X. Zhao, J. Liu, B. Zhu, Z. Luo, H. Miao // *Ceramics International.* – 1997. – Vol. 23, No. 3. – P. 197–202.

4. Heimann, R. B. [The title of the article is not specified] / R. B. Heimann, H. D. Lehmann // Recent Patents on Materials Science. – 2008. – Vol. 1. – P. 41.
5. Fauchais, P. [The title of the article is not specified] / P. Fauchais, A. Vardelle, B. Dussoubs // Journal of Thermal Spray Technology. – 2001. – Vol. 10, No. 1. – P. 44.
6. Vuoristo, P. [Article title not specified] / P. Vuoristo, P. Nylén // Journal of Thermal Spray Technology. – 2007. – Vol. 16, No. 4. – P. 466.
7. Cherenda, N. N. Methods of mechanical testing of materials: manual / N. N. Cherenda, N. I. Polyak, V. I. Shimansky. – Minsk: BSU, 2017. – 135 p.
8. Astashynski, V. M. Generation of Erosion Compression Plasma Flows in a Miniature Plasma Accelerator and Their Capability for Formation of Thin Nanostructured Coating / V. M. Astashynski, H. M. Dzahnidze, E. A. Kostyukevich, A. M. Kuzmitski, P. N. Shoronov, V. I. Shymanski, V. V. Uglov // High Temperature Material Processes. - 2020. - Vol. 24, No. 2. - P. 99–107.
9. Uglov, V. V. Modification of Materials by Compression Plasma Flows / V. V. Uglov, N. N. Cherenda, V. M. Anishchik, V. M. Astashynski, N. T. Kvasov. - Minsk: BSU, 2011. - 252 p.
10. Yunusov, M. Yu. Complex aluminum grease for friction units of modern machines and mechanisms / M. Yu. Yunusov, M. S. Kholikzoda, Sh. Sharifov, O. S. Niyozov // Polytechnic Bulletin. Series: Engineering Research. - 2025. - No. 4 (72). - P. 97-101. - DOI: 10.65599/UJEU4043.
11. Bodurbekov, F. S. Change in the quality of motor oil - an indicator of the current state of automobile engines / F. S. Bodurbekov, M. Yu. Yunusov, B. Zh. Mazhitov, N. B. Sakhibov // Peasant. - 2018. - No. 1. - P. 38-40.

МАЪЛУМОТ ДАР БОРАИ МУАЛЛИФОН-СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ- INFORMATION ABOUT AUTHORS

TJ	RU	EN
Ҳайдаров Муҳсинҷон Умаралиевич	Хайдаров Мухсинджон Умаралиевич	Khaidarov Muhsinjon Umaralievich
ҳодими илмӣ	научный сотрудник	research scientist
Институти физикаю техника ба номи С.У. Умарови Академияи миллии илмҳои Тоҷикистон	Физико-технический институт им.С.У. Умарова Национальной академии наук Таджикистана	S.U. Umarov Institute of Physics and Technology, National Academy of Sciences of Tajikistan
E-mail: muhsinhajdarov@gmail.com		
TJ	RU	EN
Черенда Николай Николаевич	Черенда Николай Николаевич	Cherenda Nikolay Nikolaevich
н.и.ф.м., дотсент	к.ф.-м.н., доцент	Ph.D., Associate Professor
Донишгоҳи давлатии Белоруссия	Белорусский государственный университет	Belarusian State University
TJ	RU	EN
Окилов Эминҷон Эркинович	Окилов Эминджон Эркинович	Okilov Eminjon Erkinovich
муҳандиси	инженер	is an engineer
Институти физикаю техника ба номи С.У. Умарови Академияи миллии илмҳои Тоҷикистон	Физико-технический институт им. С.У. Умарова Национальной академии наук Таджикистана	S.U. Umarov Institute of Physics and Technology, National Academy of Sciences of Tajikistan

АНОДНОЕ ПОВЕДЕНИЕ ОЛОВЯННОГО БАББИТА SnSb11Cu6 С ЛИТИЕМ В СРЕДЕ РАСТВОРА NaCl

¹И.Н. Ганиев, ²С.С. Саидов, ¹М.М. Махмадизода, ³Ш.Ш. Окилов., ⁴И.Ш. Идиев

¹Таджикский технический университет имени академика М.С. Осими, г. Душанбе, Республика Таджикистан

²Филиал Национального исследовательского технологического университета «МИСИС» в г. Душанбе, Душанбе, Таджикистан

³Институт химии им. В.И. Никитина НАНТ, Душанбе, Таджикистан

⁴Таджикский национальный университет, Душанбе, Таджикистан

В работе исследовано влияние легирования литием на анодное поведение и коррозионную стойкость оловянного баббита SnSb11Cu6 в хлоридсодержащих средах. Рассмотрены области применения баббитов в машиностроении, энергетике, судостроении и транспортной промышленности; отмечено, что их востребованность обусловлена сочетанием антифрикционных свойств, износостойкости и коррозионной устойчивости. Объектом исследования выступил сплав SnSb11Cu6 (на основе высокочистых олова, сурьмы и меди) с добавками лития в диапазоне 0,01–1,0 мас. %; плавку проводили в шахтной печи при 650 °С. Электрохимические характеристики изучали потенциостатическим методом в потенциодинамическом режиме (скорость развёртки – 2 мВ/с) на приборе ПИ-50-1.1 в растворах NaCl концентрацией 0,03, 0,3 и 3,0 %; использовали трёхэлектродную схему с хлорсеребряным электродом сравнения и платиновым вспомогательным электродом. Поверхность образцов подготавливали шлифовкой с последовательным уменьшением зернистости и дополнительной полировкой; для удаления оксидных плёнок применяли катодную поляризацию. Определены ключевые электрохимические параметры: потенциал свободной коррозии, потенциал питтингообразования, потенциал репассивации, ток и скорость коррозии (рассчитанная через электрохимический эквивалент олова). Установлено, что потенциал свободной коррозии стабилизируется примерно через 50 минут после погружения образца в электролит. Выявлена закономерность: рост содержания лития в сплаве вызывает смещение потенциалов коррозии, питтингообразования и репассивации в положительную область во всех исследованных средах.

Ключевые слова: оловянный баббит SnSb11Cu6 ; потенциал коррозии; литий, потенциостатический метод; потенциал питтингообразования; раствор NaCl ; скорость коррозии.

РАФТОРИ АНОДИИ ХҶЛАИ БАББИТИ ҚАЛЪАГИИ SnSb11Cu6 БО ЛИТИЙ ДАР МУҲИТИ МАҲЛУЛИ NaCl

И.Н. Ганиев, С.С. Саидов, М.М. Махмадизода, Ш.Ш. Окилов, И.Ш. Идиев

¹Донишгоҳи техникии Тоҷикистон ба номи академик М.С. Осимӣ, ш. Душанбе, Ҷумҳурии Тоҷикистон

²Филиали Донишгоҳи миллии тадқиқотии технологӣ «МИСИС» дар шаҳри Душанбе, Душанбе, Ҷумҳурии Тоҷикистон

³Институти химияи ба номи В.И. Никитини Академияи миллии илмҳои Тоҷикистон, Душанбе, Ҷумҳурии Тоҷикистон

⁴Донишгоҳи миллии Тоҷикистон, Душанбе, Ҷумҳурии Тоҷикистон

Дар мақола таъсири ҷавҳаронидан ба литий ба рафтори анодӣ ва устувории коррозионии баббити қалъагии SnSb11Cu6 дар муҳитҳои дорои хлорид тадқиқ карда шудааст. Соҳаҳои истифодаи баббитҳо дар мошинсозӣ, энергетика, киштисозӣ ва саноати нақлиёт баррасӣ шудаанд; қайд гардидааст, ки серхаридории онҳо ба нишон додани хосиятҳои антифрикционӣ, тобоварӣ ба ҳӯрдашавӣ ва устуворӣ ба коррозия вобаста аст. Объекти тадқиқот ҳулаи SnSb11Cu6 (дар заминаи қалъагӣ, сурма ва миси дорои тозагии баланд) бо иловаҳои литий ба андозаи 0,01–1,0% мас. мебошад; гудозиш дар кӯраи шахтавӣ дар ҳарорати 650 °С гузаронида шуд. Тавсифоти электрохимиявӣ бо усули потенциостатикӣ дар режими потенциодинамикӣ (суръати тасниф – 2 мВ/с) дар асбоби ПИ-50-1.1 дар маҳлулҳои NaCl бо консентратсияи 0,03, 0,3 ва 3,0% омӯхта шуданд; схемаи сеэлектродӣ бо электроди муқоисавии хлорнукрагӣ ва электроди ёрирасони платинӣ истифода шуд. Сатҳи намунаҳо тавассути суфтан бо камшавии пайдарпайи андозаи донаҳо ва сайқалдиҳии иловагӣ омода карда шуд; барои нест кардани пардаҳои оксидӣ поляризацияи катодӣ истифода гардид. Нишондиҳандаҳои калидии электрохимиявӣ муайян карда шуданд: потенциали коррозияи озод, потенциали питтингҳосилшавӣ, потенциали репассиватсия, ҷараён ва суръати коррозия (ки тавассути эквиваленти электрохимиявии қалъагӣ ҳисоб карда шудааст). Муайян карда шуд, ки потенциали коррозияи озод тақрибан пас аз 50 дақиқаи ба электролит андохтани намуна устувор мегардад. Қонуниятҳои ошкор карда шуд: афзоиши миқдори литий дар ҳула боиси ба самти мусбат кӯчидани потенциалҳои коррозия, питтингҳосилшавӣ ва репассиватсия дар тамоми муҳитҳои тадқиқшуда мегардад.

Калидвожаҳо: баббити қалъагӣ SnSb11Cu6 ; литий, усули потенциостатикӣ; маҳлули NaCl ; потенциали зангзанӣ; потенциали питтинг; суръати зангзанӣ.

ANODIC BEHAVIOR OF TIN BABBIT ALLOYS SnSb11Cu6 WITH LITHIUM IN A NaCl SOLUTION MEDIUM

I.N. Ganiev, S.S. Saidov, M.M. Makhmadizoda, Sh.Sh. Okilov, I.Sh. Idiev

¹Tajik Technical University named after Academician M.S. Osimi, Dushanbe, Tajikistan²Dushanbe Branch of the National University of Science and Technology "MISiS", Dushanbe, Tajikistan³V.I. Nikitin Institute of Chemistry of the National Academy of Sciences of Tajikistan, Dushanbe, Tajikistan⁴Tajik National University, Dushanbe, Tajikistan

The paper studies the effect of lithium alloying on the anodic behavior and corrosion resistance of tin babbitt SnSb11Cu6 in chloride-containing environments. The paper considers the areas of babbitt application in mechanical engineering, power engineering, shipbuilding and transport industries; it is noted that their demand is due to a combination of antifriction properties, wear resistance and corrosion resistance. The object of the study was SnSb11Cu6 alloy (based on high-purity tin, antimony and copper) with lithium additives in the range of 0.01–1.0 wt. %; melting was carried out in a shaft furnace at 650 °C. The electrochemical characteristics were studied by the potentiostatic method in the potentiodynamic mode (scan rate - 2 mV/s) on a PI-50-1.1 device in NaCl solutions with a concentration of 0.03, 0.3 and 3.0%; A three-electrode circuit with a silver chloride reference electrode and a platinum auxiliary electrode was used. The sample surfaces were prepared by grinding with a successive reduction in grain size and additional polishing; cathodic polarization was used to remove oxide films. Key electrochemical parameters were determined: free corrosion potential, pitting potential, repassivation potential, current, and corrosion rate (calculated using the electrochemical equivalent of tin). It was found that the free corrosion potential stabilizes approximately 50 minutes after immersion of the sample in the electrolyte. A pattern was revealed: an increase in the lithium content in the alloy causes a shift in the corrosion, pitting, and repassivation potentials toward the positive region in all studied environments.

Keywords: tin babbitt SnSb11Cu6; lithium, potentiostatic method; NaCl solution; corrosion potential; pitting potential; corrosion rate.

Введение

В современной практике широко применяются различные материалы, однако о некоторых из них пользователи обладают недостаточным объемом информации. К числу широко применяемых антифрикционных материалов относятся баббиты. Баббиты - металлические сплавы на основе свинца, в состав которых вводятся небольшие количества легирующих компонентов. Благодаря совокупности эксплуатационных свойств и разнообразию областей использования данные материалы занимают важное место как в промышленной сфере, так и в повседневной практике. Легированные оловянные сплавы характеризуются высокими антифрикционными свойствами, что обуславливает их широкое применение при изготовлении деталей и узлов машин, работающих в условиях трения и скольжения. Существенным преимуществом оловянных баббитов является их относительно невысокая стоимость, которая нередко становится определяющим фактором при выборе материала для решения различных инженерно-технических задач. Помимо этого, такие сплавы обладают повышенной устойчивостью к коррозионному воздействию, что обеспечивает возможность их эффективной эксплуатации в условиях повышенной влажности и при непосредственном контакте с водной средой [1].

Баббиты — это сплавы, используемые для изготовления подшипников скольжения. Впервые они были созданы американским изобретателем Исааком Баббитом в 1839 году, откуда и получили свое название. Основные компоненты баббитов включают олово, медь и сурьму, хотя в некоторых случаях используются свинцовые баббиты, в которых олово заменено на свинец. Эти сплавы характеризуются высокой износостойкостью и хорошими антифрикционными свойствами, что делает их идеальными для применения в условиях высокой нагрузки и трения. Баббиты широко применяются в машиностроении, особенно в двигателях и турбинах [2].

Оловянные баббиты относятся к группе антифрикционных сплавов, основой которых служит олово, легированное такими элементами, как медь и сурьма. Данные материалы широко применяются для заливки подшипников скольжения, предназначенных для эксплуатации при высоких скоростях вращения, средних и повышенных нагрузках, а также в условиях сравнительно низких температур. Применяются в турбинах, прокатных станах, дизелях, компрессорах и тяжелом машиностроении. Оловянные баббиты характеризуются высоким содержанием олова, доля которого, как правило, составляет 80–90 %, а также наличием легирующих добавок меди и сурьмы. Подобное соотношение компонентов формирует благоприятную структуру сплава, обеспечивающую высокую

механическую прочность, повышенную коррозионную стойкость и выраженные антифрикционные свойства. Благодаря совокупности указанных характеристик данные материалы находят широкое применение в узлах трения машин и механизмов, эксплуатируемых при значительных нагрузках и высоких скоростях скольжения [3, 4].

Основная область применения – это машиностроение, где они используются для изготовления подшипников двигателей, турбин, компрессоров и других вращающихся механизмов. Их свойства позволяют минимизировать трение и износ, что увеличивает срок службы оборудования и снижает затраты на техническое обслуживание [5].

Кроме того, баббиты находят применение в судостроении, энергетике и транспортной промышленности. В судостроении они используются в подшипниках судовых двигателей и валов, что обеспечивает надежную и долговечную работу в условиях высокой влажности и коррозионной активности. В энергетике применяются в турбинах и генераторах, где важна высокая нагрузочная способность и устойчивость к нагреву. В транспортной промышленности они используются в железнодорожных и автомобильных подшипниках, обеспечивая плавность хода и долговечность деталей [6].

Баббиты также применяются в производстве крупных промышленных машин и станков, где надежность и долговечность подшипников являются критически важными параметрами [6].

Целью данного сообщения является исследование анодного поведения оловянного баббита $\text{SnSb}_{11}\text{Cu}_6$, легированного литием, в среде раствора NaCl различной концентрации.

Материалы исследования

В качестве исходного материала использовали оловянный баббит состава $\text{SnSb}_{11}\text{Cu}_6$, полученный на основе высокочистых металлических компонентов. В экспериментах использовали высококачественные исходные металлы: олово марки О1 ($\text{Sn} \geq 99,99\%$ согласно ГОСТ 860–75), сурьму марки Су00 ($\text{Sb} \geq 99,99\%$ по ГОСТ 1089–82) и медь марки М0 ($\text{Cu} \geq 99,99\%$ по ГОСТ 859–2014). Для легирования сплава $\text{SnSb}_{11}\text{Cu}_6$ вводили металлический литий марки ЛиВ ($\text{Li} \geq 99,9\%$ по ГОСТ 8595–79). Плавку и добавление легирующего агента выполняли в лабораторной шахтной печи СШОЛ при 650°C . Концентрацию лития изменяли от 0,01 до 1,0 мас. %. Электрохимические свойства сплавов изучали на цилиндрических пробах диаметром 8 мм и длиной 140 мм, отлитых из расплава в графитовую форму (изображена на рис. 1). Анализ проводили потенциостатическим методом, изложенным в источниках [8].



Рисунок 1 - Образцы $\text{SnSb}_{11}\text{Cu}_6$ с добавками лития
Figure 1 – $\text{SnSb}_{11}\text{Cu}_6$ samples with lithium additives

Методика исследования

Электрохимические свойства образцов определяли потенциостатическим методом в потенциодинамическом режиме на приборе ПИ-50-1.1 при скорости развертки 2 мВ/с. Тестирование осуществляли в водном растворе хлорида натрия (NaCl). Электрохимическая ячейка функционировала по трехэлектродной схеме: в качестве электрода сравнения использовали

хлорсеребряный электрод, тогда как вспомогательным электродом служил платиновый. Следует отметить, что состояние поверхности рабочего электрода оказывает заметное влияние на величину регистрируемого потенциала. В связи с этим исследования изменения потенциала во времени проводили с применением двух различных способов подготовки поверхности образцов.

Механическая обработка заключалась в последовательном шлифовании поверхности образца абразивной наждачной бумагой с постепенным переходом от более крупной зернистости к более мелкой (№ 2–00). После завершения шлифования образцы тщательно промывали дистиллированной водой, затем осуществляли дополнительную полировку с использованием увлажнённой фильтровальной бумаги. На заключительном этапе образцы подвергали естественной сушке на воздухе.

Исследования показали, что через некоторое время потенциал свободной коррозии (бестоковый потенциал) стабилизируется и перестает зависеть от метода предварительной обработки поверхности электрода. Учитывая это, поверхность проб для регистрации потенциодинамических кривых подготавливали механически, дополняя катодной поляризацией для удаления оксидных пленок.

Процедура регистрации поляризационных кривых сплавов в хлоридсодержащей среде проиллюстрирована на примере оловянного баббита SnSb11Cu6 (рис. 2). В ходе электрохимических тестов пробы подвергали потенциодинамической анодной поляризации — от установившегося потенциала после погружения в электролит до скачка плотности тока, указывающего на начало питтингообразования (рис. 2, кривая I). Далее поляризацию обращали в обратном направлении (рис. 2, кривые II и III) до $-1,3$ В. В данных условиях происходило растворение ранее сформировавшейся оксидной плёнки на поверхности образца. Затем поляризацию повторяли в анодном направлении, фиксируя соответствующую кривую сплава (рис. 2, кривая IV). На рис. 2 приведен полный набор потенциодинамических кривых для оловянного баббита SnSb11Cu6 , полученных в 3,0%-ном водном растворе NaCl.

В процессе регистрации полной поляризационной зависимости рассчитывали ключевые электрохимические характеристики:

- $E_{\text{ст.}}$ или $E_{\text{св.кор.}}$ — стационарный потенциал или потенциал свободной коррозии;
- $E_{\text{р.п.}}$ — потенциал репассивации;
- $E_{\text{п.о.}}$ — потенциал питтингообразования;
- $E_{\text{кор.}}$ — потенциал коррозии;
- $i_{\text{кор.}}$ — ток коррозии.

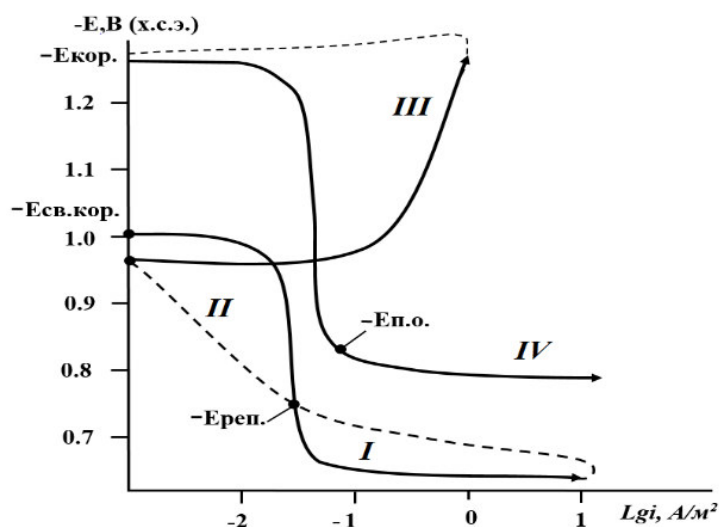


Рисунок 2 – Полная потенциодинамическая поляризационная кривая (2 мВ/с) оловянного баббита SnSb11Cu6 в 3,0%-ном растворе NaCl

Figure 2 – Complete potentiodynamic polarization curve (2 mV/s) of tin-based babbitt SnSb11Cu6 in a 3.0% NaCl solution

Поскольку в нейтральных электролитах коррозия сплавов ограничена катодным процессом ионизации кислорода, ток коррозии $i_{\text{корр}}$ рассчитывали по катодной ветви потенциодинамических кривых с учетом тафелевской константы равной 0.12В.

Скорость коррозии определяли по формуле:

$$K = i_{\text{корр}} \cdot k,$$

где $k = 1,108 \text{ г/А} \cdot \text{ч}$ - электрохимический эквивалент олова.

Результаты и их обсуждение

Анализ изменения потенциала свободной коррозии во времени для оловянного баббита состава SnSb11Cu6, легированного добавками лития, в растворе NaCl (рис. 3) показывает, что по мере выдержки образцов в электролите наблюдается постепенное смещение потенциала в положительную область. Указанная тенденция проявляется независимо от концентрации лития в составе исследуемого сплава.

Установлено, что спустя приблизительно 50 мин после погружения образца в электролит значение потенциала свободной коррозии достигает устойчивого уровня и далее практически не изменяется. Таким образом, после указанного времени в системе устанавливается стационарное состояние, что подтверждается данными, представленными на рисунке 3.

Анализ полученных данных электрохимических испытаний оловянного баббита SnSb11Cu6 с добавками лития в качестве легирования в NaCl-растворах разной концентрации выявил универсальную тенденцию: рост доли лития в сплаве вызывает положительное смещение потенциалов коррозии, питтингообразования и репассивации во всех изученных средах. Это указывает на существенное влияние лития на электрохимические свойства материала (табл. 1).

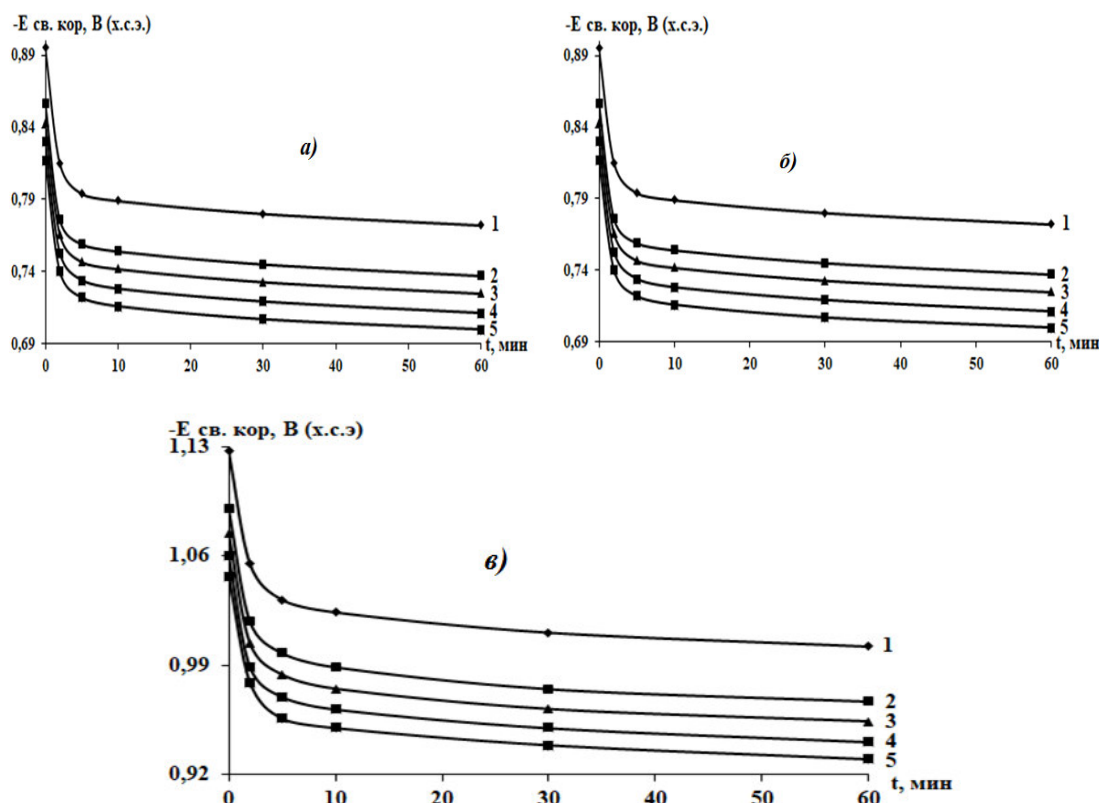


Рисунок 3 – Временная зависимость потенциала свободной коррозии ($-E_{\text{св. кор.В}}$) оловянного баббита SnSb11Cu6 (1), содержащего литий, мас. %: 0,05 (2); 0,1 (3); 0,5 (4); 1,0 (5), в среде раствора 0.03% (а), 0.3% (б) и 3.0%-ного (в) NaCl

Figure 3 – Time dependence of the free corrosion potential ($-E_{\text{св. кор.В}}$) of tin-based babbitt SnSb11Cu6 (1) containing lithium additives with mass fractions of 0.05 (2); 0.1 (3); 0.5 (4); and 1.0 wt.% (5) in 0.03% (a), 0.3% (b), and 3.0% (c) NaCl solutions

Таблица 1 - Коррозионно-электрохимические свойства оловянного баббита SnSb11Cu6, легированного литием, в растворе NaCl

Table 1 – Corrosion-electrochemical properties of lithium-alloyed tin-based babbitt SnSb₁₁Cu₆ in NaCl solution

Среда NaCl	Содержание лития в сплаве баббите мас. %	Электрохимические потенциалы, В (х.с.э.)				Скорость коррозии	
		$-E_{св.кор.}$	$-E_{кор.}$	$-E_{п.о.}$	$-E_{р.л.}$	$i_{кор} \cdot 10^2, \text{А/м}^2$	$K \cdot 10^3, \text{г/м}^2 \cdot \text{ч}$
0.03	SnSb11Cu6	0.772	1.160	0.680	0.641	5.9	65.3
	0.05	0.737	1.127	0.642	0.590	5.7	63.1
	0.1	0.725	1.112	0.634	0.581	5.5	60.9
	0.5	0.711	1.104	0.627	0.574	5.3	58.7
	1.0	0.700	1.096	0.618	0.566	5.1	56.5
0.3	SnSb11Cu6	0.885	1.220	0.760	0.710	7.8	86.4
	0.05	0.849	1.182	0.727	0.657	7.6	84.2
	0.1	0.836	1.173	0.719	0.646	7.4	81.9
	0.5	0.823	1.164	0.710	0.637	7.2	79.7
	1.0	0.811	1.157	0.702	0.629	7.0	77.5
3.0	SnSb11Cu6	1.002	1.270	0.825	0.750	9.6	106
	0.05	0.967	1.247	0.782	0.698	9.4	104
	0.1	0.954	1.223	0.763	0.690	9.2	101
	0.5	0.941	1.215	0.754	0.682	9.0	99.7
	1.0	0.930	1.207	0.742	0.673	8.8	97.5

Зависимость скорости коррозии оловянного баббита SnSb11Cu6 добавлением лития от концентрации NaCl (0,03; 0,3 и 3,0%) показана на рисунке 4. Экспериментальные результаты демонстрируют, что добавление лития в состав сплава приводит к заметному снижению скорости коррозионного разрушения во всех исследованных электролитических средах. Одновременно наблюдается прямое влияние концентрации хлорид-ионов: её увеличение вызывает рост скорости коррозии (рис. 5).

Анализ данных показывает, что минимальные значения как скорости коррозии, так и плотности коррозионного тока достигаются при содержании лития в баббите на уровне 1,0 мас. %, что указывает на выраженный ингибирующий эффект данного легирующего элемента на электрохимическое поведение сплава.

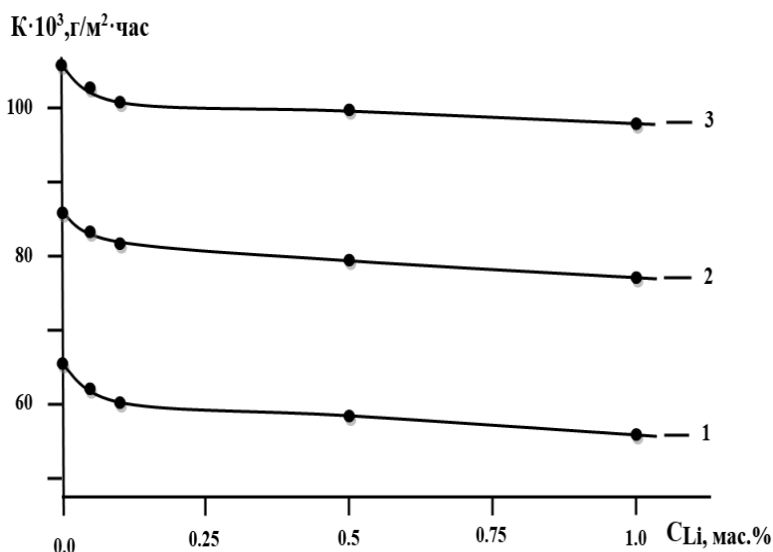


Рисунок 4 – Зависимость скорости коррозии оловянного баббита SnSb11Cu6 с литием в среде раствора 0,03(1); 0,3(2); 3,0%-ного (3) NaCl

Figure 4 – Dependence of the corrosion rate of lithium-containing tin-based babbitt SnSb₁₁Cu₆ in 0.03% (1), 0.3% (2), and 3.0% (3) NaCl solutions

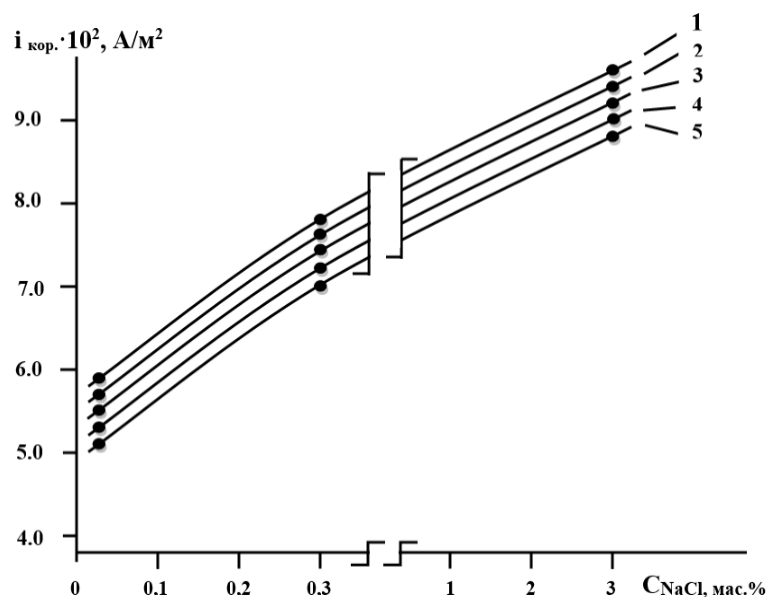
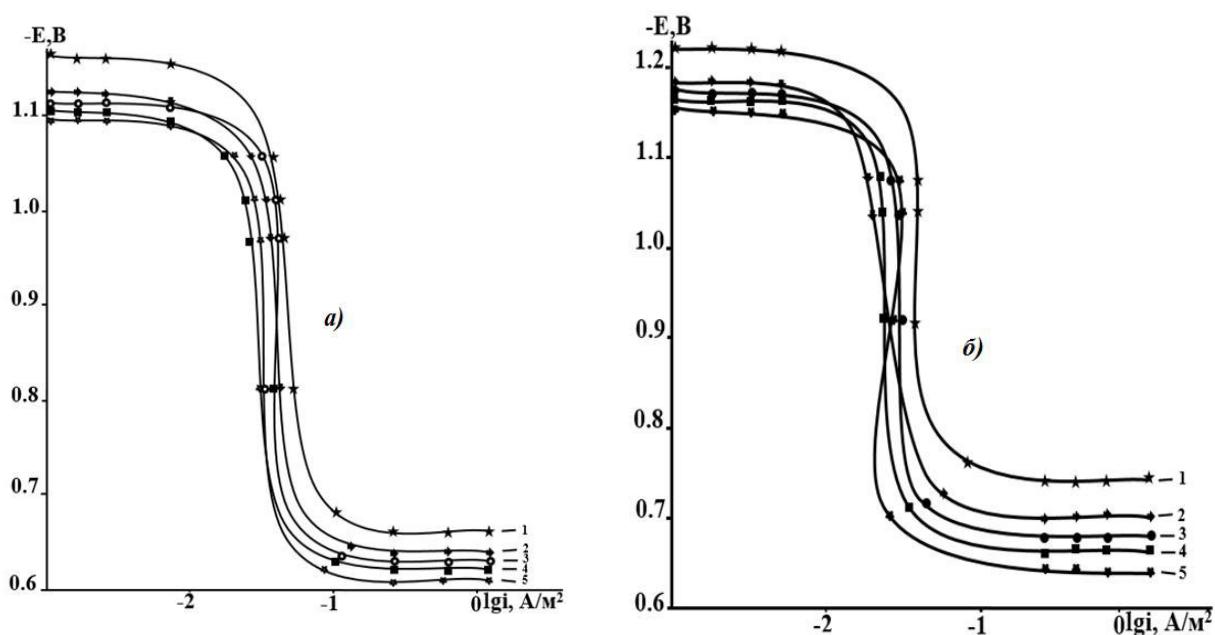


Рисунок 5 – Зависимость плотности тока коррозии оловянного баббита SnSb11Cu6 (1), содержащего литий, мас. %: 0.05(2); 0.1(3); 0.5(4); 0.1(5), от концентрации NaCl

Figure 5 – Dependence of the corrosion current density of tin-based babbitt SnSb₁₁Cu₆ (1) containing lithium additives with mass fractions of 0.05 (2), 0.1 (3), 0.5 (4), and 1.0 wt.% (5) on the NaCl concentration

Анодные ветви потенциостатических кривых оловянного баббита SnSb11Cu6 с литием представлены на рис. 6. Установлено, что с увеличением содержания лития наблюдается смещение потенциалов свободной коррозии ($E_{св.кор.}$) и потенциала питтингообразования ($E_{п.о.}$) в сторону более положительных значений. Одновременно отмечается снижение плотности коррозионного тока исследуемых сплавов. Данные изменения сопровождаются сдвигом анодных ветвей потенциодинамических кривых сплава SnSb11Cu6, легированного литием, в область более высоких (положительных) потенциалов.



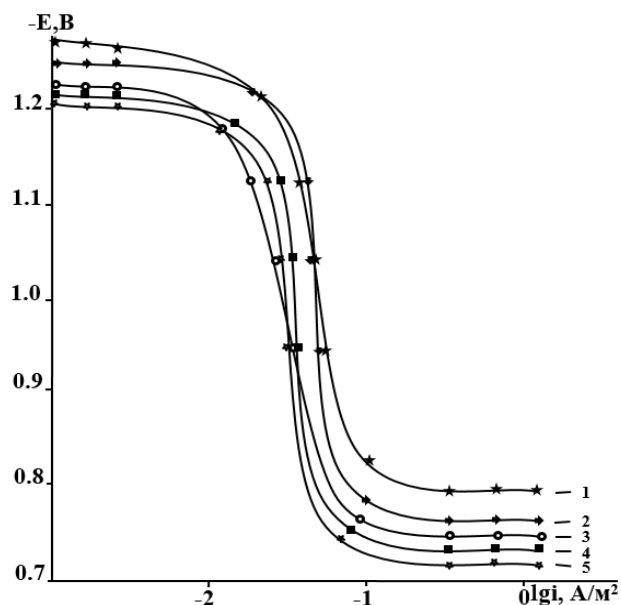


Рисунок 7 – Потенциодинамические анодные поляризационные (2 мВ/с) кривые оловянного баббита $\text{SnSb}_{11}\text{Cu}_6$ (1), содержащих литий, мас. %: 0,05 (2); 0,1 (3); 0,5 (4); 1,0 (5), в среде раствора 0,03 % (а), 0,3 % (б) и 3,0 %-ного (в) NaCl
 Figure 7 – Potentiodynamic anodic polarization curves (2 mV/s) of tin-based babbitt $\text{SnSb}_{11}\text{Cu}_6$ (1) containing lithium additives with mass fractions of 0.05 (2), 0.1 (3), 0.5 (4), and 1.0 wt.% (5) in 0.03% (a), 0.3% (b), and 3.0% (c) NaCl solutions

Выводы

Наличие лития в оловянном баббите $\text{SnSb}_{11}\text{Cu}_6$ приводит к снижению скорости анодной коррозии, что свидетельствует о повышении коррозионной устойчивости данного сплава. Улучшение коррозионной стойкости оловянного баббита $\text{SnSb}_{11}\text{Cu}_6$ с добавлением щелочного металла связано с его воздействием на структуру материала.

Введение лития в состав сплава приводит к смещению потенциалов коррозии, инициирования питтинговой коррозии и процессов репассивации в положительную область, что обеспечивает снижение скорости коррозионного разрушения исходного сплава примерно на 15 %. Одновременно такая модификация существенно повышает устойчивость материала к питтинговой коррозии, улучшая его эксплуатационные характеристики в агрессивных средах.

Рецензент: Бердиев А.Э. – д.т.н., профессор кафедры «Химии и биологии» Российско-Таджикского (Славянского) университета

Литература

1. Тарельник, В. Б. Прирабочные покрытия подшипников скольжения / В. Б. Тарельник, Б. Антошевский, В. С. Марцинковский // Вестник ХНТУСГ им. П. Василенко. – 2015. – № 159. – С. 90–104.
2. ГОСТ 1320-74. Баббиты оловянные и свинцовые. Технические условия. – М.: ИПК Издательство стандартов, 2001.
3. Бешевли, О. Б. Особенности теплового состояния баббитов при механической обработке / О. Б. Бешевли, Т. А. Дуюн // Вестник БГТУ им. В. Г. Шухова. – 2010. – № 2(85). – С. 75–81.
4. Чуев, К. В. Моделирование теплового состояния баббита в процессе фрезерования / К. В. Чуев, О. Б. Бешевли, Т. А. Дуюн // Вестник БГТУ им. В. Г. Шухова. – 2010. – № 2(85). – С. 96–101.
5. Резай, Б. Влияние температуры отливки сплава Pb-Sb-Sn для решётки пластины аккумуляторной батареи на поляризацию при выделении кислорода в свинцовых кислотных аккумуляторах / Б. Резай, К. В. Чуев // Электрохимия. – 2006. – Т. 42, № 4. – С. 401–405.
6. Jauch, U. Thermophysical Properties in the System Li-Pb . Pt. I–III / U. Jauch, G. Haase, V. Karcher, B. Schulz // Kernforschungszentrum Karlsruhe Report 4144. – 1986. – 82 p.
7. Ганиев, И. Н. Анодное поведение свинцово-сурьмяного сплава SSu_3 с калием в среде электролита NaCl / И. Н. Ганиев, Ш. Ш. Окилов, Б. Б. Эшов, Н. М. Муллоева, Ж. Х. Джайлоев // Материаловедение. – 2022. – № 12. – С. 33–38.
8. Исмонов, Р. Д. Влияние галлия и таллия на микроструктуру и механические свойства алюминий-бериллиевого сплава / Р. Д. Исмонов, А. М. Сафаров, С. С. Раджабаев, С. Т. Бадурдинов // Политехнический вестник. Серия: Инженерные исследования. – 2024. – № 1(65). – С. 65–68.

Reference

1. Tarelnik, V. B. Running-in Coatings of Plain Bearings / V. B. Tarelnik, B. Antoshevsky, V. S. Martsinkovsky // Bulletin of Kharkiv National Technical University of Mechanical Engineering named after P. Vasilenko. - 2015. - No. 159. - P. 90-104.
2. GOST 1320-74. Tin and Lead Babbitts. Specifications. - Moscow: IPK Publishing House of Standards, 2001.

3. Beshevli, O. B. Features of the Thermal State of Babbitts during Mechanical Treatment / O. B. Beshevli, T. A. Duyun // Bulletin of Belgorod State Technical University named after V. G. Shukhov. - 2010. - No. 2 (85). - P. 75-81.
4. Chuev, K. V. Modeling the Thermal State of Babbitt during Milling / K. V. Chuev, O. B. Beshevli, T. A. Duyun // Bulletin of BSTU named after V. G. Shukhov. - 2010. - No. 2 (85). - P. 96-101.
5. Rezai, B. Effect of Pb-Sb-Sn Alloy Casting Temperature for Battery Plate Grid on Polarization during Oxygen Evolution in Lead Acid Batteries / B. Rezai, K. V. Chuev // Electrochemistry. - 2006. - Vol. 42, No. 4. - P. 401-405.
6. Jauch, U. Thermophysical Properties in the System Li-Pb. Pt. I-III / U. Jauch, G. Haase, V. Karcher, B. Schulz // Kernforschungszentrum Karlsruhe Report 4144. - 1986. - 82 p.
7. Ganiev, I. N. Anodic behavior of lead-antimony alloy CSU3 with potassium in a NaCl electrolyte medium / I. N. Ganiev, Sh. Sh. Okilov, B. B. Eshov, N. M. Mulloeva, Zh. Kh. Dzhalilov // Materials Science. - 2022. - No. 12. - pp. 33-38.
8. Ismonov, R. D. Effect of gallium and thallium on the microstructure and mechanical properties of aluminum-beryllium alloy / R. D. Ismonov, A. M. Safarov, S. S. Radzhabaliev, S. T. Baduridinov // Polytechnic Bulletin. Series: Engineering Research. - 2024. - No. 1 (65). - P. 65-68.

МАЪЛУМОТ ДАР БОРАИ МУАЛЛИФОН – СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ – INFORMATION ABOUT AUTHORS

TJ	RU	EN
Ганиев Изатулло Наврузович	Ганиев Изатулло Наврузович	Ganiev Izatullo Navruzovich
д.и.х., профессор	д.х.н., профессор	Doctor of Chemical Sciences, Professor
Донишгоҳи техники Тоҷикистон ба номи акад. М.С. Осимӣ	Таджикский технический университет им. акад. М.С. Осими	Tajik Technical University named after acad. M.S. Osimi
E-mail: ganievizatullo48@gmail.com		
TJ	RU	EN
Саидов Саидхожа Саймуродович	Саидов Саидходжа Саймуродович	Saidov Saidkhoja Saymurodovich
Ассистент	Ассистент	Assistant
Филиали Донишгоҳи миллии тадқиқотӣ технологияи МИСИС дар ш. Душанбе	Филиал Национального исследовательского технологического университета МИСИС в городе Душанбе	Branch of the National University of Science and Technology MISIS in Dushanbe
TJ	RU	EN
Махмадизода Муродали Махмадӣ	Махмадизода Муродали Махмади	Makhmadizoda Murodali Makhmadi
д.и.т., профессор	д.т.н., профессоор	Doctor of Technical Sciences, Professor
Донишгоҳи техники Тоҷикистон ба номи акад. М.С. Осимӣ	Таджикский технический университет им. акад. М.С. Осими	Tajik Technical University named after acad. M.S. Osimi
TJ	RU	EN
Окилов Шахром Шукурбоевич	Окилов Шахром Шукурбоевич	Okilov Shakhrom Shukurbovich
н.и.т.	к.т.н.	Candidate of Technical Sciences
Институти химияи ба номи В.И. Никитинаи Академияи миллии илмҳои Тоҷикистон.	Институт химии им. В.И. Никитина Национальной академии наук Таджикистана	V. I. Nikitin Institute of Chemistry, National Academy of Sciences of Tajikistan
TJ	RU	EN
Идиев Идиҳуджа Шарифович	Идиев Идиҳуджа Шарифович	Idiev Idikhudja Sharifovich
н.и.т., муаллими калон	к.т.н., старший преподаватель	Candidate of Technical Sciences, Senior Lecturer
Донигоҳи миллии Тоҷикистон	Таджикского национального университета	Tajik National University

УДК: 669.45.018.8.24/882

DOI: 10.65599/ENG4752

ТАЪСИРИ ИЛОВАИ ТАЛЛИЙ БА МИКРОСОХТОР ВА ХОСИЯТҲОИ МЕХАНИКИИ БАББИТИ ҚАЛЪАГӢ Б83

И.Н. Ганиев, Х.Д. Музафаров, Р.Д. Исмонзода, Х.М. Хочаназаров

Донишгоҳи техникии Тоҷикистон ба номи академик М.С. Осимӣ, ш. Душанбе, Ҷумҳурии Тоҷикистон

Дар мақола микросохтор ва хосиятҳои механикии баббити қалъагӣ Б83 бо иловаи таллий таҳқиқ карда шудааст. Баббити қалъагӣ Б83 ҳулаи асосан қалъагӣ (Sn) буда, одатан дорои сурма (Sb) ва мис (Cu) мебошад ва барои милдонҳои лағжишӣ васеъ истифода бурда мешавад. Ворид намудани таллий (Tl) ҳамчун унсурӣ ҷавҳароникунанда ба тағйирёбии таркиби фазавӣ ва сохтори дохилии моддаи ҷузъҳои сахт дар заминаи мулоими баббити қалъагӣ мусоидат менамояд. Натиҷаҳои таҳқиқоти металлографӣ нишон медиҳанд, ки дар сохтори ибтидоии баббити қалъагӣ Б83 фазаҳои сахти интерметаллидии навъи SnSb ва Cu_6Sn_5 дар матритсаи α -Sn паҳн шудаанд. Иловаи таллий ба майдашавии донаҳо, якхелашавии тақсимои фазаҳои сахт ва коҳиши андозаи онҳо оварда мерасонад. Бо иловаи таллий беҳтар гардидани қобилияти борбардорӣ ва баландшавии устувории сохторӣ баббити қалъагӣ Б83 мусоидат менамояд. Таҳқиқотҳои механикӣ нишон медиҳанд, ки бо зиёд намудани миқдори оптималии таллий сахтӣ ва устувории фарсудашавӣ меафзояд, дар ҳоле ки пластикӣ дар ҳадди қобили қабул нигоҳ дошта мешавад. Инчунин, коҳиш додани ташаккули таркишҳои микроскопӣ дар сарҳадҳои донагӣ мушоҳида карда мешавад, ки ба муҳлати зиёд истифода бурдани милдонҳо таъсири мусбат мерасонад. Таҳқиқотҳо нишон медиҳанд, ки ҷавҳаронии баббити қалъагӣ Б83 бо иловаи оптималии таллий боиси тақмилёбии микросохтор ва беҳтар шудани хосиятҳои механикӣ гардида, барои истифодаи суръатҳои баланд ва борҳои зиёд тавсия дода мешавад.

Калимаҳои калидӣ: баббити қалъагӣ Б83; таллий; микросохтор; фазаҳои интерметаллидӣ; α -Sn матритса; SnSb; Cu_6Sn_5 майдашавии донаҳо; сахтӣ; устувории фарсудашавӣ; хосиятҳои механикӣ; милдонҳои лағжишӣ.

ВЛИЯНИЕ ДОБАВОК ТАЛЛИЯ НА МИКРОСТРУКТУРА И МЕХАНИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА ОЛОВЯННОГО БАББИТА Б83

И.Н. Ганиев, Х.Д. Музафаров, Р.Д. Исмонзода, Х.М. Ходжаназаров

Таджикский технический университет имени академика М.С. Осими, г. Душанбе, Республика Таджикистан

В статье исследованы микроструктура и механические свойства твердого баббита марки Б83 с добавкой таллия. Баббит Б83 представляет собой сплав на основе олова (Sn), обычно содержащий сурьму (Sb) и медь (Cu), и широко используется для скользящих подшипников. Введение таллия (Tl) в качестве легирующего элемента способствует изменению фазового состава и внутренней структуры твердых компонентов в мягкой матрице баббита. Результаты металлографических исследований показали, что в исходной структуре баббита Б83 твердые интерметаллические фазы типа SnSb и Cu_6Sn_5 распределены в матрице α -Sn. Добавка таллия приводит к измельчению зерен, выравниванию распределения твердых фаз и уменьшению их размера. Улучшение несущей способности и повышение структурной устойчивости баббита Б83 наблюдается при введении таллия. Механические испытания показали, что при оптимальном содержании таллия увеличиваются твердость и износостойкость, при этом пластичность сохраняется на допустимом уровне. Кроме того, наблюдается снижение склонности к образованию микроскопических трещин на границах зерен, что положительно влияет на долговечность работы подшипников. Таким образом, легирование твердого баббита Б83 оптимальным количеством таллия способствует улучшению микроструктуры и механических свойств и рекомендуется для применения при высоких скоростях и больших нагрузках.

Ключевые слова: оловянный баббит Б83; таллий; микроструктура; интерметаллидные фазы; матрица α -Sn; SnSb; Cu_6Sn_5 ; измельчение зерен; твердость; износостойкость; механические свойства; подшипники скольжения.

EFFECT OF THALLIUM ADDITIVES ON THE MICROSTRUCTURE AND MECHANICAL PROPERTIES OF TIN BABBITTE B83

I.N. Ganiev, Kh.D. Muzafarov, R.D. Ismonzoda, Kh.M. Khojanazarov

Tajik Technical University named after Academician M.S. Osimi, Dushanbe, Republic of Tajikistan

This article examines the microstructure and mechanical properties of solid babbitt grade B83 with the addition of thallium. Babbitt B83 is a tin (Sn)-based alloy, usually containing antimony (Sb) and copper (Cu), and is widely used for sliding bearings. The introduction of thallium (Tl) as an alloying element contributes to a change in the phase composition and internal structure of the solid components in the soft babbitt matrix. The results of metallographic studies have shown that in the initial structure of babbitt B83, solid intermetallic phases of the SnSb and Cu_6Sn_5 types are distributed in the α -Sn matrix. The addition of thallium leads to grain grinding, leveling the distribution of solid phases and reducing their size. An improvement in the bearing capacity and an increase in the structural stability of babbitt B83 is observed with the introduction of thallium. Mechanical tests have shown that with optimal thallium content, hardness and wear resistance increase, while plasticity remains at an acceptable level. In addition, there is a decrease in the tendency to form microscopic cracks at grain boundaries, which has a positive effect on the durability of bearings. Thus, alloying solid babbitt B83 with an optimal amount of thallium improves the microstructure and mechanical properties and is recommended for use at high speeds and heavy loads.

Keywords: tin-based babbitt B83; thallium; microstructure; intermetallic phases; α -Sn matrix; SnSb; Cu_6Sn_5 ; grain refinement; hardness; wear resistance; mechanical properties; sliding bearings

Муқаддима

Баббитҳо ҳулаҳои махсуси антифрикционӣ мебошанд, ки асосан аз қалъагӣ, сурб ва унсурҳои ҷавҳароникунанда иборатанд. Онҳо бо хосиятҳои баланди антифрикционӣ, қобилияти пластикии хуб ва коэффитсиенти пасти соиш тавсиф мешаванд. Баббитҳои қалъагӣ ҳангоми истифода ҳамчун маводи милдонӣ дорои маҷмӯи хосиятҳои мусоид мебошанд: устуворӣ ба зангзани, қобилияти бардошти сарбориҳои назаррас ва мутобиқшавӣ ба сатҳи корӣ [1].

Мутобиқи тамғагузориҳои стандартӣ, баббитҳои қалъагӣ ва сурбӣ (Б88, Б83, Б83С, Б16, БН, БС6) ва баббитҳои беқалъагӣ (БКА, БК2, БК2Ш) бо ҳарфи «Б» ишора карда мешаванд. Рақамҳо миқдори миёнаи қалъагиро бо фоиз нишон медиҳанд. Ҳарфҳои Н, К, С, Т мутаносибан мавҷудияти никел, калсий, сурб ва теллурро ифода мекунанд. Баббитҳо асосан дар мошинсозӣ ва таҷҳизоти саноатӣ истифода мешаванд, ки дар онҳо муҳлати кор ва эътимодноки аҳамияти ҳалкунанда доранд [2].

Соҳаи асосии истифодаи баббитҳо мошинсозӣ мебошад. Онҳо барои тайёр кардани милдонҳои муҳаррикҳо, турбинаҳо, компрессорҳо ва дигар механизмҳои гардишкунанда васеъ истифода мешаванд. Хосиятҳои антифрикционӣ имкон медиҳанд, ки соиш ва фарсудашавӣ кам шуда, муҳлати хизматрасонии таҷҳизот афзоиш ва хароҷоти амалиётӣ кам гардад. Баббитҳо инчунин дар киштисозӣ, энергетика ва нақлиёт мавқеи муҳим доранд: дар киштисозӣ дар милдонҳои муҳаррикҳо ва меҳварҳо, дар энергетика дар турбинаҳо ва генераторҳо, ва дар нақлиёт дар милдонҳои роҳи оҳан ва автомобилӣ истифода мешаванд [3, 4].

Истеҳсоли баббит мутобиқи ГОСТ 1320-74 бо истифода аз қалъагӣ, сурб, сурма ва унсурҳои ҷавҳароникунанда амалӣ карда мешавад. Интиҳоби таносуби оптималии компонентҳо ва назорати қатъии ҳарорат барои ташаккули микросохтори мутаносиб аҳамияти калон дорад. Раванди технологӣ марҳилаҳои тайёркунии ашёи хом, гармкунии пешакии тигел, боркунии пайдарпайи металлҳо, гудозиш ва омехтакунии интенсивӣ, тоза намудани шлак, устуворсозии таркиб ва рехтани баббит ба қолаб ё бевосита ба милдонро дар бар мегирад. Ҳарорати рехтагарӣ одатан 450–500°C нигоҳ дошта мешавад, ва суръати хунукшавӣ ба майдашавии донаҳо ва тақсимои якхелаи фазаҳои саҳт таъсир мерасонад [5].

Сохтори баббит гетерогенӣ буда, аз матритсаи мулоим ($\alpha\text{-Sn}$ ё $\alpha\text{-Pb}$) ва зарраҳои саҳти интерметаллидӣ иборат аст. Матритса қобилияти пластикӣ ва мутобиқшавӣ таъмин менамояд, дар ҳоле ки фазаҳои саҳти интерметаллидӣ, аз қабилҳои SnSb ва Cu_6Sn_5 , вазифаи қабули сарбориро иҷро мекунанд. Дар марҳилаи ибтидоии кор матритса ба сатҳи мил мутобиқ гардида, ноҳамворихоро ҷуброн мекунад, ва зарраҳои саҳт қисми асосии борро қабул мекунанд. Дар раванди фарсудашавӣ матритса қисман хориҷ шуда, зарраҳои саҳт «каркаси борбардор»-ро ташкил менамоянд, ки коэффитсиенти соишро коҳиш медиҳад ва устувории фарсудашавиро баланд мебардорад [6-8].

Баббити Б83 одатан барои милдонҳои мошинҳои иқтисодӣ баланд истифода мешавад, ки талаботи баланд ба коэффитсиенти пасти соиш ва қобилияти бардошти сарборӣ доранд. Ин милдонҳо метавонанд суръати муҳити то 50 м/с, ҳарорати корӣ то 75°C ва коэффитсиенти соиш бо молидан то 0,005 таъмин намоянд, ки ба милдон имкон медиҳад сарбории зиёда аз 100 кг/см²-ро таҳаммул кунад [9-10].

Ҳамин тавр, хусусиятҳои баббит на танҳо ба таркиби химиявӣ, балки пеш аз ҳама ба микросохтори дуфазаӣ (матрицаи мулоим ва зарраҳои саҳт) вобастаанд. Ин сохтор механизми мутавозини кории баббитро таъмин намуда, қобилияти баланд ба антифрикционӣ, борбардорӣ ва устувории дарозмуддатро таъмин мекунад. Аз ин рӯ, таҳқиқоти сохторӣ ва оптимизатсияи таркиб дар рушди баббитҳои баландсифат аҳамияти калон доранд.

Ҳадафи кори мазкур омӯзиши микросохтор ва хосиятҳои механикии баббити қалъагӣ Б83 бо иловаи таллий таҳқиқ карда шудааст.

Мавод ва усулҳои тадқиқот

Баббити қалъагӣ тамғаи Б83, ки бо иловаи таллий ҷавҳаронида шудааст, дар ҳарорати 450–500°C дар печи лаборатории навъи СШОЛ бо усули гудозиши компонентҳои ибтидоӣ ҳосил карда шуд. Барои тайёр намудани ҳула аз қалъагӣ тамғаи ОВЧ-000 (99,999 %) мувофиқи ГОСТ 860-75, мис тамғаи М0 (99,93 %) тибқи ГОСТ 859-2014, сурмаи металлӣ тамғаи Су00 (99,9 %) мутобиқи ГОСТ 1089-82 ва таллий тамғаи Тл 0000 (Тl 0000) мувофиқи ГОСТ 18337 истифода гардид.

Микдори таллий дар таркиби баббита ибтидоӣ дар доираи 0,05–1,0 % массавӣ тағйир дода шуд. Назорати таркиби химиявӣ ҳулаҳо бо роҳи вазнкунии дақиқи шихта ва инчунин тавассути ченкунии массаи намунаҳои ҳосилшуда амалӣ карда шуд. Агар фарқи массаи ҳисобшуда ва массаи воқеии намуна зиёда аз 3 % бошад, равандии синтези ҳула тақрибан гузаронида мешуд.

Яке аз усулҳои муҳими таҳқиқи мавод омӯзиши микросохтори ҳулаҳо ба ҳисоб меравад. Таҳлили микроструктура имкон медиҳад таъсири коркарди деформатсионӣ ва ҳароратиро ба сохтор муайян намуда, ҳамзамон омилҳое, ки ба хосиятҳои маҳсулоти тайёр ва пайдоиши нуқсонҳо таъсир мерасонанд, муайян карда шаванд. Омӯзиши микросохтори баббита Б83, ки бо таллий ҷавҳаронида шудааст, бо истифода аз микроскопи оптикӣ навъи БИОМЕД-1 анҷом дода шуд.

Таҳқиқоти микроскопии металлҳо ва ҳулаҳо, ки аксар вақт микроанализ номида мешавад, ба омӯзиши сохтори дохилии онҳо бо ёрии микроскоп асос ёфтааст. Барои ин мақсад намунаҳои махсус омодашуда истифода мешаванд, ки онҳоро микрошлиф меноманд.

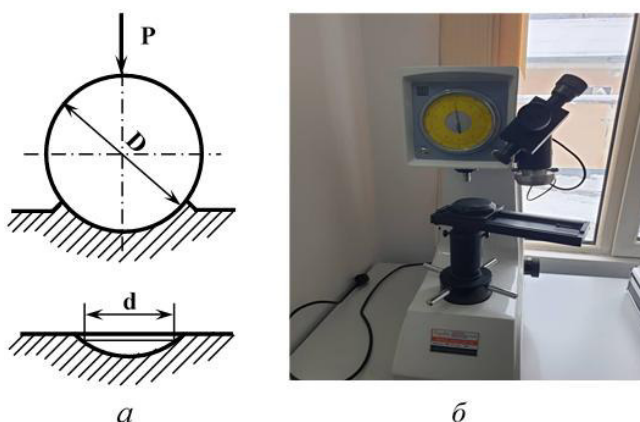
Омодасозии микрошлиф одатан аз интиҳоб ва буридани намуна аз қитъаи муайяни объекти таҳқиқшаванда оғоз мегардад. Қисмати интиҳобшуда вобаста ба вазифаи таҳқиқот муайян карда мешавад, масалан, минтақаи наздик ба ҷои шикаст, тарқиш ё дигар нуқсонҳои конструксионӣ.

Барои тайёр намудани микрошлифҳо одатан намунаҳои шакли чоркунча ё силиндрӣ истифода мешаванд. Андозаи намунаҳо чунин интиҳоб карда мешавад: паҳлӯи чоркунча ё диаметри онҳо тақрибан 10–20 мм, баландии онҳо бошад 10–30 мм мебошад. Пас аз буридани намунаҳо, онҳо бо истифода аз қоғазҳои суфтакунӣ тадриҷан сайқал дода мешаванд то он даме ки хатҳои харошидашуда пурра нест гарданд. Раванди суфтакунӣ аз қоғазҳои абразивии дорои андозаи дона 150–50 мкм оғоз гардида, баъдан ба қоғазҳои абразивии майдатар бо андозаи 20–5 мкм гузаронида мешавад.

Ҳангоми гузариш аз як қоғазӣ абразивӣ ба қоғазӣ дигаре, ки андозаи донаи он майдатар мебошад, зарур аст самти ҳаракати суфтакунӣ тақрибан ба 90° тағйир дода шавад. Ин амал имкон медиҳад, ки изҳои харошидаи марҳилаи пешина пурра бартараф гардида, сатҳи намуна ба таври яксон омода карда шавад. Барои иҷрои ин раванд одатан дастгоҳҳои махсус истифода мешаванд, ки дар онҳо қоғазҳои суфтакунӣ ба шакли лентаҳои даврзананда ё дискҳои гардишкунанда маҳкам карда мешавад.

Таҳқиқотҳои таҷрибавӣ мубоқи методикаҳое гузаронида шуданд, ки тартиби онҳо дар адабиёти илмӣ дахлдор [10] муфасссал шарҳ дода шудааст.

Бо мақсади омӯзиши микросохтори ҳулаҳо намунаҳои шакли силиндрӣ омода карда шуданд. Андозаи онҳо чунин интиҳоб гардид: дарозӣ дар ҳудуди 5–10 мм ва диаметри онҳо 10–16 мм. Баъд аз анҷоми марҳилаи суфтакунӣ намунаҳо барои равшан намудани сохтори металлографӣ дар маҳлули 20-фоизаи кислотаи нитрат дар муддати 10–20 сония травление карда шуданд.



Расми 1 – Нақшаи озмоиши сахтӣ тибқи усули Бринелл (ГОСТ 9012–59) (а) ва дастгоҳи ченкунии сахтӣ MODEL HBRV-187.5D (б)

Figure 1 – Brinell hardness test performed in accordance with GOST 9012–59 (a) and the MODEL HBRV-187.5D hardness testing machine (b)

Барои муайян намудани сахтии ҳулаҳо усули Бринелл истифода гардид, ки мувофиқи талаботи ГОСТ 9012–59 амалӣ карда мешавад. Моҳияти ин усул аз он иборат аст, ки ба сатҳи намунаи озмоишшаванда сақои пӯлодии дорои диаметри муайян D (2,5; 5; 10 мм) бо таъсири сарбории муайян F дар давоми вақти муайян фишурда мешавад (расми 1 а).

Ин усули ченкунӣ як қатор бартариҳо дорад: иҷрои он нисбатан содда мебошад, натиҷаҳои ченкунӣ дақиқии кофӣ доранд ва талабот ба дараҷаи тозагии сатҳи намуна нисбат ба баъзе усулҳои дигар камтар аст. Илова бар ин, байни қимати сахтӣ HB ва нишондиҳандаи ов (ҳадди мустаҳкамӣ) қобилияти таҷрибавӣ устувор мушоҳида мешавад.

Қимати сахтӣ аз рӯи усули Бринелл бо аломати HB ишора мегардад. Дар ин ишора H ҳарфи аввали калимаи англисии Hardness буда, маънои сахтиро ифода мекунад, дар ҳоле ки B ба номи муаллифи усули мазкур Johan August Brinell мувофиқ аст.

Аз нуқтаи назари физикӣ, нишондиҳандаи сахтии Бринелл ҳамчун нисбати қувваи сарбории таъсиркунанда F ба масоҳати сатҳи изи сферии ба вучудода S дар сатҳи намуна муайян карда мешавад. Арзиши ҳосилшуда одатан бо воҳидҳои кг/мм² ё МПа ифода мегардад.

Ҳисобкунии ин нишондиҳанда мувофиқи ифодаи математикӣ (формула) анҷом дода мешавад, ки шакли он чунин аст:

$$HB = \frac{P}{S} \quad (1)$$

Сахтӣ, ки тавассути диаметри сақо D ва диаметри изи ҳосилшуда d ифода мегардад, бо формулаи зерин тавсиф карда мешавад:

$$HB = \frac{2P}{\pi D(D - \sqrt{D^2 - d^2})} \quad (2)$$

Барои гузаронидани озмоиш дастгоҳи ченкунии сахтӣ MODEL HBRV-187.5D (расми 1 б) истифода гардид.

Намунаҳое, ки барои санҷиш омода карда шуданд, шакли цилиндрӣ дошта, ғафсии онҳо тақрибан 10 мм ва диаметрашон 16 мм интихоб карда шуд. Ченкунии сахтӣ бо истифода аз сақои пӯлодии диаметраш D = 10 мм анҷом дода шуда, ба сатҳи намуна сарбории P = 250 кг таъсир дода шуд.

Озмоишҳо дар намунаҳое гузаронида шуданд, ки ғафсии онҳо аз 6 мм зиёд буда, диаметрашон 16 мм-ро ташкил меод. Ин параметрҳо имкон доданд, ки ченкунии сахтӣ бо дақиқии кофӣ ва мутобиқ ба талаботи стандартӣ амалӣ карда шавад.

Натиҷаҳои таҷрибавӣ ва муҳокимаи онҳо

Объекти асосии тадқиқот баббитаи саноатии рехтагии қалъагӣ мебошад, ки таркиби химиявӣ он ба таври зерин ифода меёбад (% массавӣ): Sb – 6; Cu – 11; боқимонда Sn. Ин навъи баббит дар амалияи муҳандисӣ ҳамчун маводи подшипникӣ васеъ истифода мешавад, зеро он дорои хосиятҳои хуби зиддфриксионӣ, қобилияти мутобиқшавӣ ба шароити кори подшипник ва устувории нисбатан баланд ба фарсудаҷавӣ мебошад. Мувофиқи таснифи байналмилалӣ ин мавод ба гурӯҳи баббитҳои баландқалъагӣ мансуб буда, ба навъи баббит B83 мувофиқат мекунад.

Бо мақсади омӯзиши таъсири элементҳои ҷавҳароникунанда ба ташаккули сохтор ва хосиятҳои механикӣ ин мавод, як қатор ҳулаҳои таҷрибавӣ ҳосил карда шуданд, ки ба таркиби онҳо таллий дар миқдори 0,05–1,0 % массавӣ илова карда шуд. Ворид намудани ин элемент ба таркиби баббит ҳамчун усули модификатсияи сохтор баррасӣ гардид, ба тағйирёбии морфология ва андозаи ҷузъҳои сохторӣ мусоидат менамояд.

Таҳлили металлографии нишон медиҳад, ки иловаҳои таллий раванди майдашавии фазаҳои сохториро ғаъол мегардонанд. Дар натиҷа микросохтори баббитаи қалъагӣ шакли системаи композитсиониро мегирад, ки аз матритсаи металлӣ нисбатан нарм ва дохилшавиҳои сахти интерметаллии дисперсӣ иборат мебошад. Матритсаи асосӣ аз қалъагӣ ташкил ёфта, бо пластикии баланд, қобилияти хуби коркардаҷавӣ ва гузаронандагии муносиби гармӣ фарқ мекунад. Дар дохили ин матритса фазаҳои эвтектикӣ ва интерметаллидҳои сурма ва мис паҳн гардидаанд, ки ба баланд гардидани устувории механикӣ мусоидат мекунад.

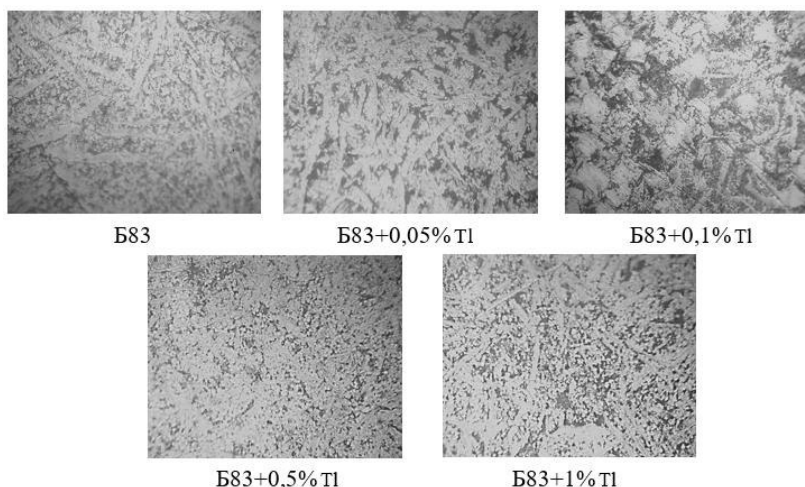
Дар ҷараёни кристаллизатсияи ҳула аввал интерметаллидҳои ҳарорати баланди мису қалъагӣ ба вучуд меоянд, аз ҷумла Cu₆Sn₅ ва Cu₃Sn, ки одатан морфологияи сӯзаншакл ё табақашакл доранд. Ин фазаҳо ҳамчун унсурҳои мустаҳкамкунандаи сохтор амал намуда, ба баланд шудани муқовимати мавод ба фарсудаҷавӣ мусоидат мекунад. Дар марҳилаҳои минбаъдаи сахтшавӣ матритсаи қалъагӣ ташаккул ёфта, дар он омехтаи эвтектикии Sn + SnSb ба вучуд меояд, ки ба устувории умумии сохтор таъсири мусбат мерасонад.

Хосиятҳои механикӣ баббит, аз ҷумла сахтӣ, мустаҳкамӣ ва устуворӣ ба фарсудаҷавӣ, бевосита ба хусусиятҳои микросохтор вобаста мебошанд. Матритсаи нисбатан нарм имконияти деформатсияи пластикиро таъмин намуда, қобилияти худмолишдиҳӣ ва мутобиқшавии сатҳҳои

тамосро баланд мебардорад. Ҳамзамон, дохилшавиҳои саҳти интерметаллӣ ҳамчун унсурҳои борбардор амал карда, муқовимати маводро ба таъсири сарбориҳои механикӣ зиёд мекунанд.

Натиҷаҳои таҳқиқ нишон медиҳанд, ки иловаҳои таллий дар ҳудуди то 1,0 % массавӣ ҳамчун модификатори фаъоли сохтор амал мекунанд. Дар ин ҳолат андозаи донаҳо ва фазаҳои интерметаллӣ хурдтар гардида, тақсимшавии онҳо дар матритса якхелатар мегардад. Чунин тағйироти сохторӣ боиси ташаккули микросохтори майдадонона ва устувортар мегардад.

Ҳамчунин муайян карда шуд, ки тағйирёбии микросохтор ба ҳосиятҳои механикӣ ҳула таъсири назаррас мерасонад. Натиҷаҳои ченкунии саҳтӣ нишон медиҳанд, ки бо зиёд гардидани миқдори таллий дар таркиби баббиту Б83 қиматҳои саҳтӣ ва мустаҳкамӣ тадриҷан тағйир меёбанд. Таъсири бештарини модификатсионӣ дар ҳолати иловаи тақрибан 1 % массавии таллий мушоҳида гардид, ки дар он сохтори ҳула нисбатан майда, якхела ва устувор мегардад (расми 2).



Расми 2 – Микросохторҳо ($\times 500$)-и баббиту қалъагӣ Б83, ки бо таллий ҷавҳаронида шудааст
Figure 2 – Microstructures ($\times 500$) of B83 tin babbitt alloy doped with thallium

Яке аз усулҳои маъмултарини арзёбии ҳосиятҳои механикӣ металлҳо ва ҳулаҳо муайян намудани саҳтӣ ба ҳисоб меравад. Ин намуди санҷиш дар амалияи материалшиносӣ васеъ истифода бурда мешавад, зеро байни сохтори дохилии мавод ва ҳосиятҳои механикӣ он робитаи зич вучуд дорад. Аз ин рӯ, аз рӯи қимати саҳтӣ мумкин аст ҳулосаҳои пешакӣ дар бораи як қатор хусусиятҳои дигари механикӣ, аз ҷумла мустаҳкамӣ, муқовимат ба фарсудаҷавӣ ва қобилияти деформатсияи пластикӣ бароварда шаванд.

Муайян намудани саҳтӣ имкон медиҳад таъсири намудҳои гуногуни коркарди ҳароратӣ ва механикӣ ба сохтори ҳулаҳо таҳлил кард. Аз ҷумла, тавассути ченкунии саҳтӣ мумкин аст муайян намуд, ки дар қисмҳои алоҳидаи ҷузъҳо дар натиҷаи тағйирёбии микросохтор дар буриши онҳо оё қабатҳои мустаҳкамшуда ё минтақаҳои бо ҳосиятҳои гуногун ташаккул ёфтаанд ё не. Чунин таҳқиқот барои баҳодиҳии сифати коркарди технологӣ ва устувории мавод аҳамияти муҳим дорад.

Барои муайян намудани ҳадди мустаҳкамии маводи таҳқиқшаванда аз рӯи натиҷаҳои ченкунии саҳтӣ формулаҳои эмпирикӣ истифода бурда мешаванд. Барои ин зарур аст, ки ифодаи ҳисобӣ интиҳоб гардида, барои навъи мушаххаси мавод қимати мувофиқи коэффисиенти таҷрибавӣ k муайян карда шавад. Баъд аз он қимати саҳтӣ, ки бо усули Johan August Brinell муайян шудааст, яъне HB, ба формула ҷойгузин карда шуда, ҳисобкунии ҳадди мустаҳкамӣ анҷом дода мешавад.

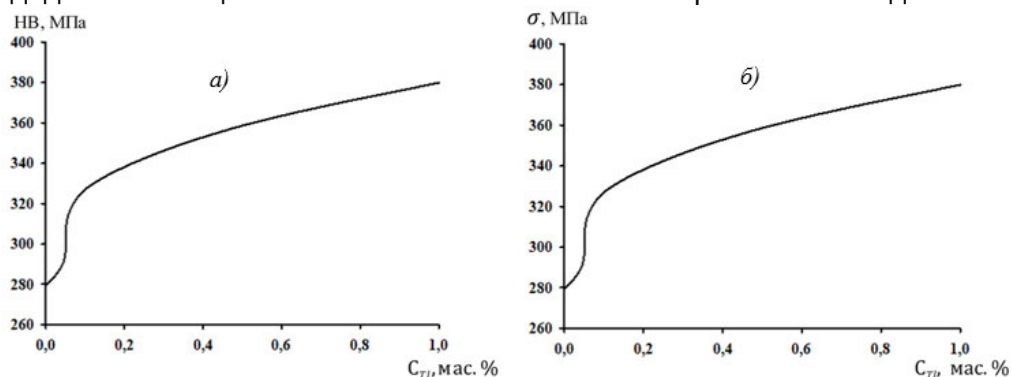
Тибқи маълумоти таҷрибавӣ, байни ҳадди мустаҳкамии металл ва қимати саҳтӣ, ки бо усули Бринелл муайян мегардад, вобастагии тақрибӣ мавҷуд аст. Ин вобастагӣ одатан бо муодилаи зерин ифода карда мешавад:

$$\sigma_B = k \cdot HB, \text{ МПа.} \quad (3)$$

Барои ҳулаҳои асосашон қалъагӣ қимати коэффисиенти таҷрибавӣ k одатан ба 0,13 баробар қабул карда мешавад. Бо дарназардошти ин нишондиҳанда арзиши ҳадди мустаҳкамӣ (σ_B) барои ҳулаҳои таҳқиқшаванда аз нав ҳисоб карда шуд. Натиҷаҳои ҳисобкуниҳо дар шакли графикӣ дар расми 3 пешниҳод гардидаанд.

Таҳлили маълумоти графикӣ нишон медиҳад, ки бо зиёд гардидани миқдори таллий дар таркиби баббита ибтидоӣ то 1,0 % массавӣ қиматҳои сахтӣ (расми 3 а) ва инчунин ҳадди мустаҳкамӣ мавод (расми 3 б) тадриҷан меафзоянд. Ин тамоюл ба он вобаста аст, ки иловаи таллий ба тағйирёбии микросохтор ва майдашавии фазаҳои сохторӣ мусоидат мекунад, ки дар натиҷа устувории механикӣ ҳула баланд мегардад.

Дар байни ҳамаи концентратсияҳои омӯхташуда таъсири бештарини модификатсионӣ ба иловаи тақрибан 1 % массавӣ таллий мувофиқат мекунад. Дар ҳамин миқдор баландшавии назарраси сахтӣ ва мустаҳкамӣ ба қайд гирифта шуда, нишон медиҳад, ки чунин миқдори таллий барои тақмил додани хосиятҳои механикӣ баббита асосӣ самаранок мебошад.



Расми 3 – Вобастагии сахтӣ (а) ва мустаҳкамӣ (б) баббита қалъагии В83 аз миқдори таллий, мас. %
Figure 3 – Effect of thallium content (wt.%) on the hardness (a) and tensile strength (b) of B83 tin babbitt

Хулоса

Таҳқиқоти баббита қалъагӣ В83, ҷавҳаронӣ бо таллий, нишон дод, ки иловаи то 1,0 % массавӣ таллий ба микросохтор ва хосиятҳои механикӣ мавод таъсири мусбат мерасонад. Фазаҳои интерметаллии SnSb ва Cu₆Sn₅ дар матритса паҳн гардида, бо иловаи таллий донаҳо майда ва тақсимои фазаҳои сахт яхела мегардад. Ин тағйирот ба афзоиши сахтӣ, устувории фарсудашавӣ ва қобилияти борбардории баббит мусоидат мекунад.

Таҳлили микросохторӣ нишон дод, ки таъсири таллий ба ҷузъҳои сохторӣ ва тақсимои фазаҳо мустақиман вобаста ба миқдори илова мебошад; таъсири максималӣ дар концентратсияи 1 % массавӣ мушоҳида шуд. Иловаи камтар аз 1 % сохторро каме майда мекунад, аммо яхела нагардонда, таъсири механикӣ пурра таъмин намекунад.

Дар маҷмӯъ, хосиятҳои баббит на танҳо аз таркиби химиявӣ, балки пеш аз ҳама аз хусусиятҳои микросохтор вобастаанд. Идоракунии дурусти таркиб ва режими технологӣ барои ба даст овардани хосиятҳои оптималии механикӣ ва антифриксионӣ аҳамияти муҳим дорад.

Муқаррир: Сафаров А.Ф. – д.и.т., дотсент, қорманди илмӣ Институти физикаю техникаи ба номи С.У. Умарови Академияи миллии илмҳои Тоҷикистон.

Адабиёт

1. Александров, В. М. Материаловедение и технология конструкционных материалов: учебное пособие. Ч. 1: Материаловедение / В. М. Александров. – Архангельск: Северный (Арктический) федеральный университет, 2015. – 327 с.
2. Лужникова, Л. П. Материалы в машиностроении. Т. 1: Цветные металлы и сплавы / Л. П. Лужникова. – М., 1967. – 287 с.
3. Семенов, А. П. Антифрикционные материалы: опыт применения и перспективы / А. П. Семенов // Трение и смазка в машинах и механизмах. – 2007. – № 12. – С. 21–36.
4. Королев, А. А. Фазовые равновесия для Pb-Sb-Sn сплава при вакуумной дистилляции / А. А. Королев, С. А. Краюхин, Г. И. Мальцев // Вестник Самарского государственного технического университета. Серия: Технические науки. – 2018. – № 1(57). – С. 128–140.
5. Rezaei, B. Effects of Casting Temperature of Pb-Sb-Sn Grid Alloy on the Polarization Potential of Oxygen Evolution of Lead Acid Batteries / B. Rezaei // Russian Journal of Electrochemistry. – 2006. – Vol. 42, No. 4. – P. 350–354.
6. Ali, E. A. Effects of Sb and/or Sn Concentrations on the SbSn Formation in a Ternary Melt-Spun Pb-Sb-Sn Alloy / E. A. Ali, M. Hameed Majeed, M. S. Gumaan, A. Alameri, Sh. M. A. M. Alsowidy, N. Q. Al Naggar, R. M. Shalaby // Results in Materials. – 2022. – Vol. 16. – Art. no. 100307.

7. ГОСТ 1320-74. Баббиты оловянные и свинцовые. Технические условия. – М.: ИПК Издательство стандартов, 2001.
8. Бешевли, О. Б. Особенности теплового состояния баббитов при механической обработке / О. Б. Бешевли, Т. А. Дуюн // Вестник БГТУ им. В. Г. Шухова. – 2010. – № 2(85). – С. 75–81.
9. Мальцев, М. В. Модифицирование структуры металлов и сплавов / М. В. Мальцев. – М.: Металлургия, 1984. – 280 с.
10. Исмонов, Р. Д. Микроструктура алюминиево-бериллиевого сплава AlBe1 с галлием и фазовый состав продуктов их окислений / Р. Д. Исмонов // Химия. Экология. Урбанистика. – 2024. – Т. 4. – С. 61–64. – EDN: RMFNGR.

Reference

1. Aleksandrov, V. M. Materials Science and Technology of Structural Materials: A Textbook. Part 1: Materials Science / V. M. Aleksandrov. – Arkhangelsk: Northern (Arctic) Federal University, 2015. – 327 p.
2. Luzhnikova, L. P. Materials in Mechanical Engineering. Vol. 1: Non-Ferrous Metals and Alloys / L. P. Luzhnikova. – Moscow, 1967. – 287 p.
3. Semenov, A. P. Antifriction Materials: Application Experience and Prospects / A. P. Semenov // Friction and Lubrication in Machines and Mechanisms. – 2007. – No. 12. – Pp. 21–36.
4. Korolev, A. A. Phase equilibria for Pb-Sb-Sn alloy during vacuum distillation / A. A. Korolev, S. A. Krayukhin, G. I. Mal'tsev // Bulletin of Samara State Technical University. Series: Technical Sciences. – 2018. – No. 1 (57). – P. 128-140.
5. Rezaei, B. Effects of Casting Temperature of Pb-Sb-Sn Grid Alloy on the Polarization Potential of Oxygen Evolution of Lead Acid Batteries / B. Rezaei // Russian Journal of Electrochemistry. – 2006. – Vol. 42, No. 4. – P. 350-354.
6. Ali, E. A. Effects of Sb and/or Sn Concentrations on the SbSn Formation in a Ternary Melt-Spun Pb-Sb-Sn Alloy / E. A. Ali, M. Hameed Majeed, M. S. Gumaan, A. Alameri, Sh. M. A. M. Alsowidy, N. Q. Al Naggar, R. M. Shalaby // Results in Materials. – 2022. – Vol. 16. – Art. no. 100307.
7. GOST 1320-74. Tin and lead babbitts. Specifications. – Moscow: IPK Publishing House of Standards, 2001.
8. Beshevli, O. B. Features of the thermal state of babbitts during mechanical processing / O. B. Beshevli, T. A. Dyun // Bulletin of BSTU im. V. G. Shukhova. – 2010. – №2(85). – P. 75–81.
9. Mal'tsev, M. V. Modification of the structure of metals and alloys / M. V. Mal'tsev. – Moscow: Metallurgy, 1984. – 280 p.
10. Ismonov, R. D. Microstructure of aluminum-beryllium alloy AlBe1 with gallium and phase composition of their oxidation products / R. D. Ismonov // Chemistry. Ecology. Urban studies. – 2024. – Vol. 4. – P. 61–64. – EDN: RMFNGR.

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРЕ – МАЪЛУМОТ ДАР БОРАИ МУАЛЛИФ – INFORMATION ABOUT AUTHOR

TJ	RU	EN
Ғаниев Изатулло Наврузович	Ганиев Изатулло Наврузович	Ganiev Izatullo Navruzovich
Академики АМИТ, доктори илмҳои химия, профессор	Академик НАНТ, доктор химических наук, профессор	Academician of the National Academy of Sciences of Tajikistan, Doctor of Chemical Sciences, Professor
ДТТ ба номи академик М.С. Осимӣ	ТТУ имени академика М.С. Осими	TTU named after academician M.S.Osimi
E-mail: ganiev48@mail.ru		
TJ	RU	EN
Музафаров Хусрав Давляталиевич	Музафаров Хусрав Давляталиевич	Muzafarov Khusrav Davlyatalievich
Унвонҷӯ	Соискатель	Applicant
ДТТ ба номи академик М.С. Осимӣ	ТТУ имени академика М.С. Осими	TTU named after academician M.S. Osimi
TJ	RU	EN
Исмонов Рустам Довудович	Исмонов Рустам Довудович	Ismonov Rustam Dovudovich
н.и.т., дотсент	к.т.н., доцент	Ph.D., associate professor
ДТТ ба номи академик М.С. Осимӣ	ТТУ имени академика М.С. Осими	TTU named after academician M.S. Osimi
E-mail: ird-78@mail.ru		
TJ	RU	EN
Хочаназаров Хайрулло Маҳмудхонович	Ходжаназаров Хайрулло Махмудхонович	Khojanazarov Khayrullo Mahmudkhonovich
н.и.т., и.в. дотсент	к.т.н., и.о. доцента	Candidate of Technical Sciences, Acting Associate Professor
ДТТ ба номи академик М.С. Осимӣ	ТТУ имени академика М.С. Осими	TTU named after academician M.S. Osimi

КЛАССИФИКАЦИЯ ДИАГРАММ ФАЗОВОГО РАВНОВЕСИЯ СПЛАВОВ С НЕСМЕШИВАЕМОСТЬЮ КОМПОНЕНТОВ И ПЕРСПЕКТИВА ИХ ПРИМЕНЕНИЯ

¹Т.Д. Джураев, ²К.Б. Нуров, ¹Э.Р. Газизова, ¹М.Т. Тошев

¹Таджикский технический университет имени академика М.С. Осими, г. Душанбе, Республика Таджикистан

²Таджикский государственный педагогический университет имени С. Айни, Душанбе, Таджикистан

В представленной работе рассмотрены особенности бинарных систем с несмешивающимися компонентами и пути решения задач по их изучению. Показано, что существуют традиционные и новые способы производства сплавов на их основе. Вкратце приведен исторический экскурс по этапам изучения указанных систем. Раскрыта перспективность и актуальность изучения и применения сплавов, полученных из компонентов, частично смешивающихся в жидком и твердом состояниях. С применением термодинамического критерия на основании оценки поведения двух произвольно взятых компонентов впервые предложена классификация диаграмм фазового равновесия расслаивающихся систем. Эти данные позволили разделить системы на предельные (с монотектическим типом взаимодействия, закрытым куполом распада и практически отсутствием взаимодействия компонентов) и промежуточные (с монотектическими типами взаимодействия с открытыми куполами распада).

Ключевые слова: несмешивающиеся компоненты, диаграммы фазового равновесия, расслоение в жидком состоянии, энергия обмена, степень ближнего порядка.

ТАСНИФИ ДИАГРАММАҲОИ МУВОЗИНАТИ ФАЗАВИИ ХҶЛАҶО БО КОМПОНЕНТҲОИ ОМЕХТАНАШАВАНДА ВА ДУРНАМОИ ТАТБИҚИ ОНҶО

¹Т.Д. Ҷӯраев, ²К.Б. Нуров, ¹Э.Р. Газизова, ¹М.Т. Тошев

¹Донишгоҳи техникии Тоҷикистон ба номи академик М.С. Осимӣ, ш. Душанбе, Ҷумҳурии Тоҷикистон

²Донишгоҳи давлатии омӯзгории Тоҷикистон ба номи Садриддин Айни

Дар ин мақола хусусиятҳои системаҳои бинарӣ бо компонентҳои омехтанашаванда ва роҳҳои ҳалли масъалаҳои барои омӯхтани онҳо баррасӣ мешаванд. Мавҷудияти усулҳои анъанавӣ ва нави истифодаи ҳулаҳоро дар асоси ин компонентҳо нишон дода шудааст. Шарҳи мухтасари таърихӣ марҳилаҳои омӯзиши ин системаҳо пешниҳод карда мешавад. Имконият ва аҳамияти омӯзиш ва татбиқи ҳулаҳое, ки аз компонентҳои қисман омехтанашаванда дар ҳолатҳои моеъ ва сахт ба даст оварда шудаанд, муайян карда шудааст. Бо истифода аз меъёри термодинамикӣ ва дар асоси арзёбии рафтори ду компоненти худсарона интихобшуда, таснифи диаграммаҳои мувозинати фазавӣ системаҳои ба қабатҳо ҷудошаванда бори аввал пешниҳод карда мешавад. Ин маълумот ба мо имкон дод, ки системаҳоро ба маҳдудкунанда (бо таъсири мутақобилаи монотектикӣ, гунбази таҷзияи пӯшида ва қариб ки таъсири мутақобилаи байни компонентҳо) ва мобайнӣ (бо намудҳои таъсири мутақобилаи монотектикӣ ва гунбазҳои таҷзияи кушода) тақсим кунем.

Калидвожаҳо: компонентҳои омехтанашаванда, диаграммаҳои мувозинати фазавӣ, ба қабатҳо ҷудошавӣ дар ҳолати моеъ, энергияи боҳаммубодила, дараҷаи тартиби наздик.

CLASSIFICATION OF PHASE EQUILIBRIUM DIAGRAMS OF ALLOYS WITH IMMISCIBLE COMPONENTS AND THEIR APPLICATION PROSPECTS

¹T.D. Juraev, ²K.B. Nurov, ¹E.R. Gazizova, ²M.T. Toshev

¹Tajik Technical University named after Academician M.S. Osimi, Dushanbe, Republic of Tajikistan

²Tajik State Pedagogical University named after S. Aini, Dushanbe, Tajikistan

This paper examines the characteristics of binary systems with immiscible components and approaches to studying them. It demonstrates the existence of traditional and new methods for producing alloys based on these components. A brief historical overview of the stages of studying these systems is provided. The potential and relevance of studying and applying alloys obtained from components partially miscible in the liquid and solid states is revealed. Using a thermodynamic criterion and based on an assessment of the behavior of two arbitrarily selected components, a classification of phase equilibrium diagrams for stratified systems is proposed for the first time. These data allowed us to divide the systems into limiting (with monotectic interaction, a closed decomposition dome, and virtually no interaction between the components) and intermediate (with monotectic interaction types and open decomposition domes).

Keywords: immiscible components, phase equilibrium diagrams, liquid-state stratification, exchange energy, degree of short-range order.

Введение

До недавнего времени [1] большое число металлических систем, проявляющих склонность к расслоению в жидком состоянии, было фактически вне практического рассмотрения. Системы с несмешивающимися компонентами (НК) обладают следующими особенностями, которые мешают специалистам широко использовать их:

- значительное различие показателей удельного веса и температуры кристаллизации участвующих компонентов;
- их склонность к неполной смешиваемости в расплавленном состоянии.

Поэтому для получения сплавов с участием НК необходимо изучить порядок формирования структурных составляющих системы для разработки технологических основ синтеза особо чистых материалов и высокоточных сплавов. Для реализации основной цели исследования нужно последовательно решить ряд вспомогательных задач, среди которых можно выделить следующие:

- анализ традиционных методов производства сплавов с НК на основе диаграмм состояния (ДС) различного типа;
- изучение поведения систем с НК с закрытым куполом расслоения при ускоренном охлаждении из состояния однородного жидкого раствора с последующим отжигом в интервале температур равновесия твердой и жидкой фаз;
- изучение особенностей твердо-жидкофазного равновесия в двойных системах с НК и, в частности, структурных и кинетических особенностей монотектического превращения (МП);
- изучение различных аспектов влияния легирующих элементов, добавляемых к твердому и жидкому реагентам на структурные и кинетические закономерности твердо-жидкофазного взаимодействия (ТЖВ);
- изучение тонких морфологических особенностей при контактном легировании;
- применение изученных закономерностей для получения новых сплавов на основе НК и изучение их структуры и свойств.

К основным традиционным и новым способам производства сплавов с НК относятся следующие [1-10]:

- спекание в порошковой металлургии;
- снижение ликвационного дефекта по плотности;
- получение из перегретого расплава гранул, подвергающихся спеканию;
- ускоренное охлаждение с отжигом высокотемпературного расплава между температурами при твердо-жидкофазном равновесии;
- литьё и кристаллизация с использованием давления;
- снижение ликвации легированием;
- принудительное перемешивание;
- ультразвуковое перемешивание;
- направленная кристаллизация;
- напыление сплавов;
- комбинированные способы производства.

Одной из попыток решения поставленных задач является классификация диаграмм фазового равновесия с точки зрения особенностей формирования в них структурообразования [(механической смеси (МС), твердого раствора (ТР), химического соединения (ХС) и промежуточных фаз (ПФ)], так как они являются достаточно информативными и позволяют исследователю прогнозировать в данной системе:

- о структурных эвтектических (ЭП) и перитектических превращениях (ПП), происходящих для любого состава при нагреве и охлаждении;
- температуры начала и конца кристаллизации расплава, которые имеют большое практическое значение;
- технологические и механические свойства сплавов;
- необходимые составы, удовлетворяющие практическим требованиям;
- технологию производства промышленных металлических материалов.

Учитывая вышеуказанные особенности бинарных систем (плотность, температуру плавления и склонность к расслаиванию) мы ДС разделили на 5 классов, которые приведены ниже и показаны на рисунке 1. При этом основывались на классическом представлении Н.С Курнакова о ДС [11] как диаграмме растворимости, позволяющем свободно понимать суть следующих происходящих в системе процессов.

Первый класс. ДС, где оба компонента неограниченно растворимы (НР) в жидком состоянии, нерастворимы в твердом и не образуют ПФ (рис. 1, а).

Второй класс. ДС, где оба компонента НР как в жидком, так и в твердом состояниях, и не образуют ПФ (рис. 1, б).

Третий класс. ДС, где оба компонента НР в жидком состоянии, ограниченно растворимы (ОР) в твердом с образованием ЭП (рис. 1, в), ПП (рис. 1, г) и не образуют ПФ.

Четвертый класс. ДС, где оба компонента НР в жидком состоянии и нерастворимы в твердом, а при затвердевании образуют ХС с сингулярной точкой с ЭП (рис. 1, д) и ХС, разлагающиеся с ПП (рис. 1, е).

Пятый класс. ДС, где оба компонента ОР как в жидком, так и в твердом состояниях (рис. 1, ж), и наблюдается НК в обоих состояниях (рис. 1, з) из-за их расслаивания в жидкости.

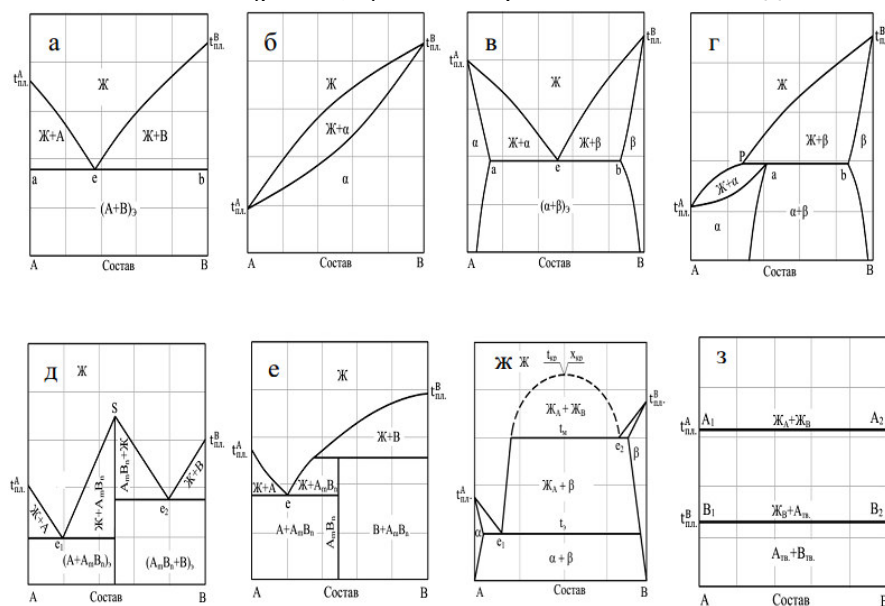


Рисунок 1 – Классификация диаграмм состояния бинарных систем
Figure 1 – Classification of binary phase diagrams

Согласно представленной классификации «удобными» являются ДС, относящиеся к классам с первого по четвертый (рис. 1, а-в, д). По ним удобно определить кристаллизацию, узкий интервал затвердевания и хорошие литейные свойства сплава. Они характеризуют технологичность сплавов. Эвтектические точки и области с самой низкой температурой плавления показывают на хорошую жидкотекучесть расплава и минимальную усадку при затвердевании. При НР компонентов в твердом состоянии образуются однородные твердые растворы, которые указывают на возможность улучшить гомогенность сплава термической обработкой.

«Неудобными» являются ДС, подразделяющиеся на третий (рис. 1, г) и четвертый (рис. 1, е) классы. Они характеризуются наличием в системе ПП, которые по времени протекают медленно и часто не успевают завершиться, что приводит к возможности ликвации по удельному весу и появлению неоднородностей в сплавах. Широкий интервал кристаллизации в системе при охлаждении повышает склонность сплава к пористости и появлению горячих трещин. Образование ПФ порой придаёт сплавам хрупкость, способствующую трудностям при обработке давлением.

Перечисленные «удобные» и «неудобные» характеристики ДС позволяют установить закономерности и разработать технологии литейных процессов, термической обработки, получения и глубокой очистки металлов и их сплавов, что является основополагающим при их практическом применении.

Для более подробного рассмотрения ДС пятого класса из выше представленной классификации необходимо провести некоторый исторический экскурс по попыткам изучения таких систем.

Достигнуть значительных успехов в разработке методик и создании универсальных методов изучения удалось к завершению сороковых годов прошлого века. Это было связано с активным

усовершенствованием акустических исследований молекулярных жидкостей. Основным объектом изучения являлись оптически прозрачные органические жидкости [12-15]. Анализ, выполненный специалистами Национального управления по авиации и исследованию космического пространства США в конце пятидесятых годов, показал [16], что существует особый тип систем компонентов наиболее перспективных с этой точки зрения. Тип систем, описание которых впервые встречается ещё в 1881 году, был назван «системами, проявляющими склонность к расслоению в жидком состоянии» или «системами несмешивающихся компонентов». В силу характерных трудностей изучения этих систем и синтеза материалов на их основе [17, 18] они практически были не использованы в технологических нуждах.

Однако исследования продолжались, и из всех опубликованных данных наиболее надежными надо признать результаты работ М.Б. Гитиса (1975 г.) и Л.Н. Соколова (1977 г.) по изучению распространения звука в расплавах расслаивающихся систем при высоких температурах [19, 20], обладающих минимальной погрешностью по чистоте изучаемого материала. Позднее В.М. Глазов со своими учениками (1985 г.) предложили методологию исследования акустических свойств в несмешивающихся системах с целью определения координат распада на кривой бинодали с помощью импульсно-фазового метода, применяя переменную акустическую базу с 2-мя пьезопреобразователями [21, 22]. Им первыми удалось применить высококачественный акустический контакт, при котором использовался высокочистый жидкий борный ангидрид, что позволило получать наиболее точные результаты исследования систем с НК.

ДС пятого класса с эффектом НК и их расслоения не имели физико-химическую интерпретацию, поэтому на протяжении многих десятилетий им не уделялось достаточного внимания. В работе [23] методами геометрической термодинамики прослежен переход ДС от первого по четвертый классы, так как эти ДС имеют общие свойства НР в жидком состоянии и переход к ДС 5-го класса (рис. 1, з) с расслоением как в жидком, так и в твердом состояниях, то есть имеется НК. Многочисленные попытки систематизации и анализа ДС с НК были далеки от завершения, не имели однозначной оценки и не раскрывали сути взаимодействия. Согласно выводам [23] «причина НК ... еще далека от выяснения». Авторы [23-25] сводят анализ эффекта расслоения к силам взаимодействия компонентов А и В над разноименными связями типа А-В. Для выяснения причин НК при сплавлении и точной оценки поведения двух произвольно взятых компонентов при этом не существовало, что сподвигло исследователей к применению статистических критериев [26-28]. Однако, этот анализ показал, что существующие критерии не позволяют провести четкое разделение ДС пятого класса с расслаиванием на системы с монотектическим типом взаимодействия (рис. 1, ж) и на системы, где НК кристаллизуются из собственных расплавов (рис. 1, з).

Большой вклад для решения данного вопроса оказали работы [29, 30], где с помощью термодинамических представлений был предложен критерий на основании оценки поведения двух произвольно взятых компонентов. Оценку производили через энергию взаимообмена (Q_{12}), которая представляет собой среднее увеличение энергии одной молекулы того или иного сорта при замене всех её соседей молекулами другого сорта. Эта величина определяется по уравнению в приближении Гильдебранда-Мотта с использованием электроотрицательностей (E), мольных объемов (V) и параметров растворимости (δ) [31]:

$$Q_{12} = V (\delta_1 - \delta_2)^2 - 23.06 Z/2 (E_1 - E_2)^2, \text{ ккал/г-атом.}, \quad (1)$$

и является одной из лучших мерил в термодинамике, применяемых для жидкого состояния [32]. Она, аналогично многим другим характеристикам [33], является периодическим свойством от положения элемента в ПТ Д.И. Менделеева. Для установления этой периодичности используется график, представляющий собой зависимость энергии взаимообмена одного из компонентов с другими элементами от их порядкового номера.

Анализ значений Q_{12} показал, что в соответствии с квазихимической теорией при $Q_{12} < 0$ сплав между компонентами 1-2 может существовать. К виду таких систем, согласно нашей классификации (рис. 1), относятся ДС с первого по четвертый классы, которые характеризуются одним общим свойством – НР в жидком состоянии. При затвердевании образуются: МС и области ОР; ХС и ПФ из жидкости, что хорошо согласуется с нашими выводами [33, 34] и опытными данными [35].

В случае $Q_{12} > 0$ компоненты в системе не смешиваются в жидком состоянии. Вид ДС таких систем относится к пятому классу (рис. 1, ж и з). Одни из них характеризуются расслоением компонентов в жидком состоянии и наличием областей ОР в твердом, что соответствует монотектическому типу взаимодействия с закрытым куполом распада (рис. 1, ж). Системы, где наблюдается НК, кристаллизующихся из собственных расплавов, приобретают другой вид ДС (рис. 1, з) с полным отсутствием взаимодействия.

Однако, характерное $Q_{12} > 0$ при этом не позволяет между собой разделить эти два вида ДС. Для дополнения этого критерия используется квазихимическое определение степени ближнего порядка в сплавах [29, 30], которое вычисляется по формуле (2):

$$(1 - \sigma_{12}) / (1 + \sigma_{12}) = \exp(-\Delta H / kT), \quad (2)$$

где k – постоянная Больцмана, T – абсолютная температура, а $\Delta H = [0.5(N_{11} + N_{22})]$ и N_{11} , N_{22} – энтальпии связи различных сочетаний пар атомов.

Рассчитанные значения совместных двух критериев Q_{12} и σ_{12} анализировались для ряда двойных систем, имеющих $Q_{12} > 0$, что позволило ДС пятого класса (рис. 1, ж и з) разделить на подклассы (рис. 2, 5.1-5.4), с соответствующими значениями: $Q_{12} > 0$, $\sigma_{12} \approx 1$ и $Q_{12} > 0$, $\sigma_{12} \approx -1$.

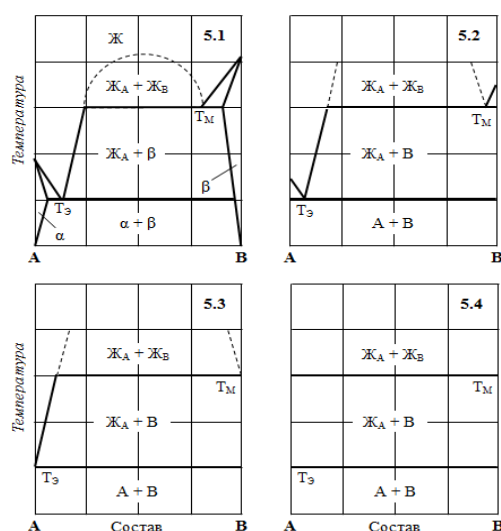


Рисунок 2 – Общий вид ДС пятого класса с подклассами 5.1-5.4
Figure 2 – General view of Class V phase diagrams with subclasses 5.1–5.4

Можно видеть (рис. 2, 5.1-5.4), что два подкласса 5.1 и 5.4 относятся к предельным видам ДС, где намечается тенденция к монотектическому типу взаимодействия. Здесь значения основных критериев примут вид: 5.1 - $Q_{12} > 0$, $\sigma_{12} \approx 1$ и 5.4 - $Q_{12} > 0$, $\sigma_{12} \approx -1$. Два других подкласса 5.2 и 5.3 относятся к промежуточным видам расслаивания с открытым куполом распада (рис. 2, 5.2, 5.3) и отвечают следующим значениям критериев: 5.2 - $Q_{12} > 0$, $\sigma_{12} \geq 0$ и 5.3 - $Q_{12} > 0$, $\sigma_{12} \leq 0$.

С точки зрения удобства применимости сплавов монотектического состава (подкласса 5.1) можно указать на отсутствие сложностей при получении достаточно однородных по составу отливок из-за того, что при изотермической кристаллизации такого сплава происходит монотектическая реакция. Здесь твёрдая фаза является ведущей, вокруг которой в виде капель, запутываясь между её дендритами, затвердевает легкоплавкий компонент.

По ДС подклассов 5.2, 5.3 и 5.4. значительно сложнее определить протекание технологического процесса получения сплавов. На ДС подклассов 5.2 и 5.3 (рис. 2) купол расслаивания открыт. Точка монотектики таких систем обычно располагается несколько ближе к высокотемпературному компоненту, в результате чего она будет содержать в составе большую часть этого компонента. Системы типа подкласса 5.2 используются для получения сплавов традиционными в литейном деле способами с ускоренной кристаллизацией. На диаграммах состояния подкласса 5.3 область несмешиваемости в жидком состоянии имеет значительный промежуток, поэтому

однородный жидкий раствор зачастую просто не изображается. Монотектический состав в подобных системах различается от основного компонента на 0.01 или 0.001 доли, а температура монотектической реакции всего лишь на пару единиц ниже температуры его кристаллизации. В этом и заключается сложность получения однородных композиций на основе таких систем, где тугоплавкий компонент может содержать незначительное количество легкоплавкого элемента. Системы подкласса 5.4 имеют два элемента, которые плавятся независимо друг от друга, не взаимодействуя между собой ни при какой температуре и ни при каком содержании, а при кристаллизации затвердевают из собственного расплава на своём уровне.

Системы с НК как перспективная основа для материалов специального назначения

ДС систем подклассов 5.2-5.4, фактически невовлеченных в техническое применение из-за трудностей производства сплавов на их основе, уже определяет перспективность и актуальность их изучения. Кроме того, даже поверхностное знакомство с физико-химическими свойствами компонентов и их сплавов показывает, что при выполнении определенных требований к их структуре можно получать самые разнообразные нетрадиционные материалы. Основные предпосылки возможностей реализации высокого уровня физико-химических свойств сплавов из НК сводятся к следующему:

- при условии равномерного распределения компонентов по объему расплава с заданной дисперсностью структурных составляющих является одной из перспектив работы получения безпористого композиционного материала, сочетающего в себе фактически исходные свойства сплавляемых компонентов, поскольку их взаимная растворимость в твердом состоянии почти отсутствует. Набор возможных сочетаний указанных свойств достаточно велик. Соответственно велики и возможности создания самых разнообразных композиций с заданными свойствами;

- структурная особенность композиционных материалов из НК заключается в том, что составляющие их фазы фактически не взаимодействуют друг с другом.

Примером может быть разработанный способ цементации Fe-Cu сплавов [35]. Введение хотя бы небольших добавок углерода в систему Fe-Cu для ее упрочнения обычным металлургическим путем невозможно из-за полного расслоения системы в его присутствии. Метод [35] фактически использует возможность избирательного легирования сплавов НК – углерод растворяется в Fe при температурах цементации и почти не взаимодействует с Cu. Благодаря этому удается сохранить равномерное распределение Fe-ной и Cu-ной фаз и сильно упрочнить первую (с поверхности).

Продолжая перечень примеров, следует отметить, что, не смотря на свою непопулярность, сплавы с НК нашли распространенное применение, которое обосновано уникальностью их свойств.

1. В силу особенностей процесса кристаллизации в системах НК в ряде случаев возможно создание сильно анизотропных направленных волокнистых структур, что предоставляет дополнительные преимущества по некоторым свойствам.

2. Для эффективного использования принципа Шарпи с целью создания антифрикционных сплавов, работающих в режиме трения скольжения, представляют интерес именно сплавы на основе легкоплавких, пластичных элементов с прочной основой, имеющих высокую теплопроводность.

3. Подтверждением сделанных заранее прогнозов могут быть примеры применения материалов на основе систем Fe-Cu-Pb, Al-Pb, Cu-Pb, Al-Sn, а сложности, сопровождающие синтез этих сплавов, подчёркивают актуальность исследования закономерностей образования в них структурных составляющих их фаз.

4. Развитие представления о механизме диссипации энергии может стать перспективной основой для создания высокодемпфирующих сплавов, сочетающих это свойство с антифрикционными характеристиками композиций на основе систем Cu-Mo, Cu-V, Cu-Nb, Cu-Fe, Cu-W, Ag-Fe, Ag-Mn, Ag-Nb.

5. Отсутствие взаимной растворимости в твердом состоянии в существующих около 70 двойных системах с НК, содержащих такие элементы как Ag, Cu, In, Al, являющиеся основой для создания полупроводниковых, токопроводящих и теплопроводящих приборов, не наблюдается резкого снижения свойств указанных элементов при их сплавообразовании.

6. Проанализировав возможности структурных формирований фаз в сплавах систем с НК таких как Cu-Pb, Ag-S, Ag-Se, Ag-Te, Cu-S, Cu-Se, Cu-Te, In-S, In-Se и In-Te, можно произвести синтез новых сплавов со сверхпроводящими и особыми электропроводящими свойствами.

7. На основе систем с НК возможно создание магнитномягких и магнитно-жестких материалов, обладающих комплексом высоких эксплуатационных качеств. Так, сплавление чистого Fe, Co, Ni или их сплавов с определенным количеством Cu и Pb может при соблюдении известных требований значительно повысить износостойкость материала при неизменной величине намагниченности насыщения и без заметного снижения его магнитной проницаемости.

8. Прогноз некоторых других возможных областей применения систем с НК из анализа физико-химических свойств компонентов включает в себя:

- разработку конструкционных материалов от радиационной защиты путем равномерного распределения по их объему или в поверхностном слое Ag, Cu и In включений Pb и других легкоплавких элементов, таких как Sn, Bi и Sb.

- разработку конструкций, работающих при повышенных температурах с помощью «выпотеваяющих» материалов, из таких систем как Cu-W, Cu-Nb, Cu-W-Sn, Cu-Nb-Sn и др.;

- топливные элементы ядерных реакторов;

- материалы с повышенной плотностью типа Cu-W, Cu-Nb, Cu-Mo.

Заключение

На основании вышеизложенного следует отметить, что проведенный анализ двойных ДС позволил произвести их новую классификацию с точки зрения «удобности» и «неудобности» их применения специалистами, а также впервые обосновать предложенный критерий для систем с несмешиваемостью компонентов, служащий разграничением ДС на предельные и промежуточные типы взаимодействия. К предельным относятся системы с монотектическим типом взаимодействия с закрытым куполом распада и практически отсутствием взаимодействия компонентов. К промежуточным типам взаимодействия относятся системы с монотектическими типами взаимодействия с открытыми куполами распада. Данная информация может служить ценным материалом при разработке технологий получения сплавов с несмешивающимися компонентами.

Рецензент: Самихов Ш.Р.-д.т.н., профессор кафедры "Технология химических производств" Таджикского национального университета.

Литература

1. Авраамов, Ю.С. Сплавы на основе систем с ограниченной растворимостью в жидком состоянии (теория, технология, структура и свойства) / Ю.С. Авраамов, А.Д. Шляпин. - М.: Интерконтакт Наука, 2002. – 371 с.
2. Портной, Д.И. Структура и свойства композиционных материалов / Д.И. Портной, С.Е. Салибеков, И.А. Светлов, В.М. Чубаров. - М.: Машиностроение, 1979. – 255 с.
3. Федорченко, И.М. Композиционные спеченные антифрикционные материалы / И.М. Федорченко, Л.И. Пугина. - Киев: Наукова думка, 1980. – 403 с.
4. Салли, И.В. Кристаллизация при сверхбольших скоростях охлаждения / И.В. Салли. - Киев: Наукова думка, 1972. – 134с.
5. Мирошниченко, И.О. Закалка из жидкого состояния / И.О. Мирошниченко. - М.: Металлургия, 1982. – 168 с.
6. Колачев, Б.А. Металловедение и термическая обработка цветных металлов и сплавов / Б.А. Колачев, В.А. Ливанов, В.И. Елагин. - М.: Металлургия. 1981. – 416 с.
7. Добаткин, В.И. Гранулируемые алюминиевые сплавы / В.И. Добаткин, В.И. Елагин. - М.: Металлургия, 1981. – 174 с.
8. Буше, Н.А. Композиционные материалы с мягкой металлической составляющей / Н.А. Буше, Г.А. Мудренко, Т.Ф. Маркова // Трение и износ. - 1982. - Т.3. - № 3. – С.396-400.
9. Авторское свидетельство СССР № 890750. Способ получения сплавов на основе систем, расслаивающихся в жидком состоянии / Ю.С. Авраамов, А.Д. Шляпин, У.Ш. Алиев. – 1981.
10. Авторское свидетельство СССР № 1001574. Способ получения композиционных материалов / Ю.С. Авраамов, А.Д. Шляпин, А.И. Кирнос, С.В. Попова, А.В. Цвященко, А.Н. Лищук. – 1982.

11. Курнаков, Н.С. Введение в физико-химический анализ / Н.С. Курнаков. – М.: АН СССР, 1940. – 562 с.
12. Ноздрев, В.Ф. Молекулярная акустика / В.Ф. Ноздрев, Н.В. Федорищенко. – М.: Высшая школа, 1974. – 288 с.
13. Михайлов, И.Г. Распространение ультразвуковых волн в жидкостях / И.Г. Михайлов. – Л.-М.: ГИТТЛ, 1949. – 152 с.
14. Кудрявцев, Б.Б. Применение ультразвуковых методов в практике физико-химических исследований / Б.Б. Кудрявцев. – Л.-М.: ГИТТЛ, 1952. – 323 с.
15. Михайлов, И.Г. Основы молекулярной акустики / И.Г. Михайлов, В.А. Соловьев, Ю.П. Сырников. – М.: Наука, 1964. – 514 с.
16. Markworth, A.J. Immiscible materials and alloys / A.J. Markworth, S.H. Gelles, J.J. Duga and W. Oldfield // Proceedings of the 3-rd Space Processing Symposium, NASA Report. – 1974. – № 74-5 – P.1003.
17. Axon, H.J. Systematization of certain binary metallic equilibrium diagrams / H.J. Axon // J. Nature. – 1948. – V.162. – P. 397.
18. Mott, B.W. Liquid immiscibility in metal systems / B.W. Mott // J. Phil. Mag. – 1957. – V.2. – P.259.
19. Гитис, М.Б. Распространение звука в металлах и полупроводниках при высоких температурах. Автореф. дисс. ... д-ра физ.-мат. наук / М.Б. Гитис. – Л.: ЛГУ, 1975. – 33 с.
20. Соколов, Л.Н. Исследование расплавов никель-кремний ультразвуковым методом / Л.Н. Соколов, Я.Л. Кац, Г.Н. Окорочков // Изв. АН СССР. Металлы. – 1977. – №4. – С.62-68.
21. Глазов, В.М. Аппаратура и методика для исследований акустических свойств электронных расплавов / В.М. Глазов, В.И. Тимошенко, С.Г. Ким // Заводская лаборатория. – 1985. – Т.51. – №3. – С.22-26.
22. Авторское свидетельство СССР № 1146591. Ультразвуковой преобразователь для контроля расплавов металлов и полупроводников / В.М. Глазов, В.И. Тимошенко, С.Г. Ким. – 1985.
23. Жуков, А.А. Геометрическая термодинамика сплавов железа / А.А. Жуков. – М.: Металлургия, 1979. – 232 с.
24. Зауэрвальд, Ф. Исследование жидких металлических расплавов / Ф. Зауэрвальд // Известия АН СССР. Отделение технических наук: Металлургия и топливо. – 1961. – № 3. – С.115-116.
25. Sauerwald, F. Uber die jetzigen Stand der systematischen Betrachtung schmelzflussiger Legierungen (Zur Systematik VII) / F.Sauerwald, P.Brand, W.Menz // Z. Metallkunde. – 1966. – Bd.57. – H.2. – S. 103-107.
26. Воздвиженский, В.М. Статистический метод прогноза взаимодействия компонентов (прогноз по критериям) / В.М. Воздвиженский // В сб.: Общие закономерности в строении диаграмм состояния металлических систем. – М.: Наука, 1973. – С. 103-108.
27. Вигдорович, В.Н. Систематизация видов взаимодействий в двойных системах на основе кальция, стронция и бария / В.Н. Вигдорович, А.В. Вахобов, Т.Д. Джураев // В сб.: Общие закономерности в строении диаграмм состояния металлических систем. – М.: Наука, 1973. – С. 121-123.
28. Воздвиженский, В.М. Прогноз двойных диаграмм состояния / В.М. Воздвиженский. – М.: Металлургия, 1975. – 224 с.
29. Джураев, Т.Д. Степень ближнего порядка – критерий для определения разновидностей расслаивающихся систем / Т.Д. Джураев, А.В. Вахобов // Доклады АН ТаджССР, 1986. – Т. 29. – № 1. – С. 32-35.
30. Джураев, Т.Д. Степень ближнего порядка и разновидности диаграмм состояния расслаивающихся систем / Т.Д. Джураев // Материалы V Всес. науч. совещания. – М.: 1989. – С. 9.
31. Hildebrand, I.H. The solubility of nonelectrolytes / I.H. Hildebrand, R.I. Scott. – N.-Y.: Reinhold publ, 1950. – 488 p.
32. Клеппа, О.Дж. Термодинамика и свойства жидких металлов / О.Дж. Клеппа // В кн.: Жидкие металлы и их затвердевание. – М.: ГосНТИ литературы по черной и цветной металлургии, 1962. – С. 67-73.
33. Джураев, Т.Д. Закономерности изменения энергии взаимообмена иония с элементами периодической таблицы (ПТ) от их порядкового номера / Т.Д. Джураев, А.С. Джафаров, К.Б. Нурув, М.Т. Тошев // Чебышевский сборник, 2023. – Т. 24. – № 5. – С. 266-273.
34. Джураев, Т.Д. Закономерности изменения энергии смешения цинка с другими элементами в зависимости от их порядкового номера / Т.Д. Джураев, С.С. Содыкова // Политехнический вестник. Серия: Инженерные исследования, 2019. – №1(45). – С. 103-105.
35. Шляпин, А.Д. Сплавы на основе систем несмешивающихся компонентов: немного истории и современное состояние проблемы. Ч. 1 / А. Д. Шляпин, В. В. Овчинников, И. А. Курбатова, Н. В. Учеваткина // Технология металлов. – 2025. – № 4. – С. 2-14. – DOI 10.31044/1684-2499-2025-0-4-2-14.

References

1. Avraamov Yu.S., Shlyapin A.D. Alloys Based on Systems with Limited Liquid-State Solubility (Theory, Technology, Structure and Properties). Moscow: Interkontakt Nauka Publ., 2002. 371 p.
2. Portnoi D.I., Salibekov S.E., Svetlov I.A., Chubarov V.M. Structure and Properties of Composite Materials. Moscow: Mashinostroenie Publ., 1979. 255 p.
3. Fedorchenko I.M., Pugina L.I. Composite Sintered Antifriction Materials. Kyiv: Naukova Dumka Publ., 1980. 403 p.
4. Salli I.V. Crystallization at Ultra-High Cooling Rates. Kyiv: Naukova Dumka Publ., 1972. 134 p.
5. Miroshnichenko I.O. Quenching from the Liquid State. Moscow: Metallurgiya Publ., 1982. 168 p.
6. Kolachev B.A., Livanov V.A., Elagin V.I. Physical Metallurgy and Heat Treatment of Non-Ferrous Metals and Alloys. Moscow: Metallurgiya Publ., 1981. 416 p.
7. Dobatkin V.I., Elagin V.I. Granulated Aluminum Alloys. Moscow: Metallurgiya Publ., 1981. 174 p.
8. Bushe N.A., Mudrenko G.A., Markova T.F. Composite Materials with a Soft Metallic Matrix. Friction and Wear. 1982;3(3):396–400.
9. USSR Author's Certificate No. 890750. Method for Producing Alloys Based on Systems Exhibiting Liquid-State Immiscibility. Avraamov Yu.S., Shlyapin A.D., Aliev U.Sh. 1981.
10. USSR Author's Certificate No. 1001574. Method for Producing Composite Materials. Avraamov Yu.S., Shlyapin A.D., Kirnos A.I., Popova S.V., Tsvyashchenko A.V., Lishchuk A.N. 1982.
11. Kurnakov N.S. Introduction to Physicochemical Analysis. Moscow: USSR Academy of Sciences Publ., 1940. 562 p.
12. Nozdrev V.F., Fedorishenko N.V. Molecular Acoustics. Moscow: Vysshaya Shkola Publ., 1974. 288 p.
13. Mikhailov I.G. Propagation of Ultrasonic Waves in Liquids. Leningrad–Moscow: State Publishing House for Technical and Theoretical Literature (GITTL), 1949. 152 p.
14. Kudryavtsev B.B. Application of Ultra-Acoustic Methods in Physicochemical Research. Leningrad–Moscow: State Publishing House for Technical and Theoretical Literature (GITTL), 1952. 323 p.
15. Mikhailov I.G., Solovyev V.A., Syrnikov Yu.P. Fundamentals of Molecular Acoustics. Moscow: Nauka Publ., 1964. 514 p.
16. Markworth A.J., Gelles S.H., Duga J.J., Oldfield W. Immiscible Materials and Alloys. In: Proceedings of the 3rd Space Processing Symposium. NASA Report. 1974;(74-5):1003.
17. Axon H.J. Systematization of Certain Binary Metallic Equilibrium Diagrams. Nature. 1948;162:397.
18. Mott B.W. Liquid Immiscibility in Metal Systems. Philosophical Magazine. 1957;2:259.
19. Gitis M.B. Propagation of Sound in Metals and Semiconductors at High Temperatures. Extended Abstract of Dr. Sci. (Physics and Mathematics) Dissertation. Leningrad: Leningrad State University, 1975. 33 p.
20. Sokolov L.N., Kats Ya.L., Okorokov G.N. Investigation of Nickel–Silicon Melts by the Ultra-Acoustic Method. Izvestiya Akademii Nauk SSSR. Metally (Bulletin of the USSR Academy of Sciences. Metals). 1977;(4):62–68.
21. Glazov V.M., Timoshenko V.I., Kim S.G. Equipment and Technique for Investigating the Acoustic Properties of Electronic Melts. Zavodskaya Laboratoriya. 1985;51(3):22–26.
22. USSR Author's Certificate No. 1146591. Ultrasonic Transducer for Monitoring Melts of Metals and Semiconductors. Glazov V.M., Timoshenko V.I., Kim S.G. 1985.
23. Zhukov A.A. Geometric Thermodynamics of Iron Alloys. Moscow: Metallurgiya Publ., 1979. 232 p.
24. Sauerwald F. Investigation of Liquid Metallic Melts. Izvestiya Akademii Nauk SSSR. Otdelenie Tekhnicheskikh Nauk. Metallurgiya i Toplivo. 1961;(3):115–116.
25. Sauerwald F., Brand P., Menz W. Über den jetzigen Stand der systematischen Betrachtung schmelzflüssiger Legierungen (Zur Systematik VII). Zeitschrift für Metallkunde. 1966;57(2):103–107.
26. Vozdvizhensky V.M. Statistical Method for Predicting Component Interaction (Prediction Based on Criteria). In: General Regularities in the Structure of Phase Diagrams of Metallic Systems. Moscow: Nauka Publ.; 1973. pp. 103–108.
27. Vigdorovich V.N., Vakhobov A.V., Dzhuraev T.D. Systematization of Interaction Types in Binary Systems Based on Calcium, Strontium and Barium. In: General Regularities in the Structure of Phase Diagrams of Metallic Systems. Moscow: Nauka Publ.; 1973. pp. 121–123.
28. Vozdvizhensky V.M. Prediction of Binary Phase Diagrams. Moscow: Metallurgiya Publ., 1975. 224 p.
29. Dzhuraev T.D., Vakhobov A.V. Degree of Short-Range Order as a Criterion for Determining the Types of Immiscible Systems. Doklady Akademii Nauk Tadzhikskoi SSR. 1986;29(1):32–35.

30. Dzhuraev T.D. Degree of Short-Range Order and Types of Phase Diagrams of Immiscible Systems. In: Proceedings of the 5th All-Union Scientific Conference. Moscow; 1989. p. 9.
31. Hildebrand J.H., Scott R.L. The Solubility of Nonelectrolytes. New York: Reinhold Publishing Corporation; 1950. 488 p.
32. Kleppa O.J. Thermodynamics and Properties of Liquid Metals. In: Liquid Metals and Their Solidification. Moscow: State Scientific and Technical Publishing House of Ferrous and Non-Ferrous Metallurgy Literature; 1962. pp. 67–73.
33. Dzhuraev T.D., Dzhaifarov A.S., Nurov K.B., Toshev M.T. Regularities in the Variation of the Exchange Energy of Indium with the Elements of the Periodic Table Depending on Their Atomic Number. *Chebyshevskii Sbornik (Chebyshev Collection)*. 2023;24(5):266–273.
34. Dzhuraev T.D., Sodykova S.S. Regularities in the Variation of the Mixing Energy of Zinc with Other Elements Depending on Their Atomic Number. *Polytechnical Bulletin. Series: Engineering Research*. 2019;(1):103–105.
35. Shlyapin A.D., Ovchinnikov V.V., Kurbatova I.A., Uchevatkina N.V. Alloys Based on Systems of Immiscible Components: A Brief History and the Current State of the Problem. Part 1. *Tekhnologiya Metallov (Metal Technology)*. 2025;(4):2–14. DOI: 10.31044/1684-2499-2025-0-4-2-14

МАЪЛУМОТ ДАР БОРАИ МУАЛЛИФОН - СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ - AINFORMATION ABOUT AUTHORS

TJ	RU	EN
Чураев Тухтасун Чураевич доктори илмҳои химия, профессор	Джураев Тухтасун Джураевич доктор химических наук, профессор	Juraev Tukhtasun Juraevich doctor of chemical sciences, professor
Донишгоҳи техникии Тоҷикистон ба номи академик М.С. Осимӣ	Таджикский технический университет имени академика М.С. Осими	Tajik Technical University named after Academician M.S. Osimi
E-mail: mcm45@mail.ru		
TJ	RU	EN
Нуров Курбонали Бозорович номзади илмҳои химия, дотсент	Нуров Курбонали Бозорович кандидат химических наук, доцент	Nurov Kurbonali Bozorovich candidate of chemical sciences, assistant professor
Донишгоҳи давлатии омӯзгории Тоҷикистон ба номи С. Айни	Таджикский государственный педагогический университет имени С. Айни	Tajik State Pedagogical University named after S. Ayni
E-mail: nurov-58@mail.ru		
TJ	RU	EN
Газизова Эльвира Рашитовна номзади илмҳои техникӣ, дотсент	Газизова Эльвира Рашитовна кандидат технических наук, доцент	Gazizova Elvira Rashitovna candidate of technical sciences, associate professor
Донишгоҳи техникии Тоҷикистон ба номи академик М.С. Осимӣ	Таджикский технический университет имени академика М.С. Осими	Tajik Technical University named after Academician M.S. Osimi
E-mail: mcm45@mail.ru		
TJ	RU	EN
Тошев Мансур Толибҷонович номзади илмҳои техникӣ, дотсент	Тошев Мансур Толибҷонович кандидат технических наук, доцент	Toshev Mansur Tolibjonovich candidate of technical sciences, associate professor
Донишгоҳи техникии Тоҷикистон ба номи академик М.С. Осимӣ	Таджикский технический университет имени академика М.С. Осими	Tajik Technical University named after Academician M.S. Osimi
E-mail: toshev1102@mail.ru		

ТЕХНОЛОГИИ КИМИЁВӢ - ХИМИЧЕСКАЯ ТЕХНОЛОГИЯ - CHEMICAL TECHNOLOGY

УДК: 536.7: 546.621+546.791: 551.242.1 (575.3)

DOI: 10.65599/ENG3118

СРАВНИТЕЛЬНЫЙ АНАЛИЗ ТЕРМИЧЕСКОЙ УСТОЙЧИВОСТИ КРИСТАЛЛОГИДРАТОВ ТОРИЯ (IV) И УРАНИЛА

¹Ф.Д. Саломов, ²М.С. Исломова, ²М.А. Бадалова, ²Г.К. Рузматова

¹Агентство по химической, биологической, радиационной и ядерной безопасности НАНТ, г. Душанбе, Таджикистан

²Таджикский технический университет имени академика М.С. Осими, г. Душанбе, Республика Таджикистан

В работе исследована термическая устойчивость и термодинамические свойства кристаллогидратов тория (IV) и уранила: $\text{Th}(\text{NO}_3)_4 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$, $\text{UO}_2(\text{CH}_3\text{COO})_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ и $\text{UO}_2\text{SO}_4 \cdot 3,5\text{H}_2\text{O}$. Цель - получить данные для оптимизации технологий переработки уран- и торийсодержащего сырья и прогнозирования свойств соединений других актинидов. Исследования выполнены методами дериватографии, рентгеноструктурного анализа и тензиметрии в неравновесных и равновесных условиях; для достижения равновесия каждая точка на барограмме выдерживалась свыше 36 часов. Установлен ступенчатый характер дегидратации и разложения соединений. Для $\text{Th}(\text{NO}_3)_4 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$ выявлен пятиступенчатый механизм: первые четыре ступени - последовательная потеря воды (300–425 K), пятая - разложение до ThO_2 и оксидов азота (427–440 K). Для $\text{UO}_2(\text{CH}_3\text{COO})_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ зафиксировано четыре ступени: удаление газов и влаги, дегидратация, разложение до UO_3 , ацетона и CO_2 (от 470 K). Для $\text{UO}_2\text{SO}_4 \cdot 3,5\text{H}_2\text{O}$ определены две ступени дегидратации (325–420 K) и распад до UO_3 и SO_3 (480–710 K по тензиметрии, 630–1200 K по ДТА). Температуры начала ступеней по тензиметрии смещены в область более низких значений на 50–70 градусов относительно данных дериватографии. Сравнительный анализ показал, что наиболее устойчивы по первым двум ступеням кристаллогидраты $\text{UO}_2\text{SO}_4 \cdot n\text{H}_2\text{O}$; для $\text{Th}(\text{NO}_3)_4 \cdot n\text{H}_2\text{O}$ отмечено усиление связи молекул воды при уменьшении их координированного числа.

Ключевые слова: кристаллогидраты нитрата тория (IV), сульфата и ацетата уранила, дегидратация, термическое разложение, равновесие.

ТАҲЛИЛИ МУҚОИСАВИИ УСТУВОРИИ ГАРМИИ КРИСТАЛЛОГИДРАТҲОИ ТОРИЙ ((IV) ВА УРАНИЛ

¹Ф.Д. Саломов, ²М.С. Исломова, ²М.А. Бадалова, ²Г.К. Рузматова

¹Агентии амнияти химиявӣ, биологӣ, радиатсионӣ ва ядроии АМИТ, ш. Душанбе, Тоҷикистон

²Донишгоҳи техникии Тоҷикистон ба номи академик М.С. Осимӣ, ш. Душанбе, Ҷумҳурии Тоҷикистон

Дар кор устувории ҳароратӣ ва ҳосиятҳои термодинамикии кристаллогидратҳои торий (IV) ва уранил: $\text{Th}(\text{NO}_3)_4 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$, $\text{UO}_2(\text{CH}_3\text{COO})_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ ва $\text{UO}_2\text{SO}_4 \cdot 3,5\text{H}_2\text{O}$ таҳқиқ карда шуданд. Мақсади тадқиқот ба даст овардани маълумот барои оптимизатсияи технологияҳои коркарди ашёи хоми ураний ва торийдор, инчунин пешгӯии ҳосиятҳои пайвастиҳои дигари актинидҳо мебошад. Тадқиқотҳо бо усулҳои дериватография, таҳлили рентгеноструктурӣ ва тензиметрия дар шароити ғайримувозинатӣ ва мувозинатӣ гузаронида шуданд; барои ба даст овардани ҳолати мувозинатӣ ҳар як нуктаи барограмма зиёда аз 36 соат нигоҳ дошта шуд. Хусусияти марҳилавии дегидрататсия ва таҷзияи пайвастиҳои муайян гардид. Барои $\text{Th}(\text{NO}_3)_4 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$ механизми панҷмарҳилавӣ муқаррар карда шуд: чор марҳилаи аввал ба хоричшавии пайдарпайи об (300–425 K), марҳилаи панҷум бошад, ба таҷзия то ҳосилшавии ThO_2 ва оксидҳои нитроген (427–440 K) вобаста мебошад. Барои $\text{UO}_2(\text{CH}_3\text{COO})_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ чор марҳила муайян карда шуд: хоричшавии газҳо ва нафӣ, дегидрататсия, таҷзия то UO_3 , ацетон ва CO_2 (аз 470 K оғоз меёбад). Барои $\text{UO}_2\text{SO}_4 \cdot 3,5\text{H}_2\text{O}$ ду марҳилаи дегидрататсия (325–420 K) ва таҷзия то UO_3 ва SO_3 муайян карда шуданд (аз рӯи маълумоти тензиметрӣ 480–710 K, аз рӯи ДТА 630–1200 K). Ҳарорати оғози марҳилаҳо, ки бо усули тензиметрӣ муайян шудаанд, нисбат ба маълумоти дериватография ба самти қиматҳои пасттар 50–70 дараҷа ҷойиваз шудаанд. Таҳлили муқоисавӣ нишон дод, ки аз рӯи ду марҳилаи аввал кристаллогидратҳои $\text{UO}_2\text{SO}_4 \cdot n\text{H}_2\text{O}$ устувории бештар доранд; барои $\text{Th}(\text{NO}_3)_4 \cdot n\text{H}_2\text{O}$ ҳангоми кам шудани шумораи координатсионии молекулаҳои об пурзӯршавии робитаи онҳо бо сохтор мушоҳида мегардад.

Калидвожаҳо: кристаллогидратҳои нитрати торий (IV), сульфат ва ацетати уранил, дегидрататсия, вайроншавии гармӣ, мувозинат.

COMPARATIVE ANALYSIS OF THE THERMAL STABILITY OF THORIUM (IV) AND URANYL CRYSTAL HYDRATES

F.D. Salomov, M.S. Islomova, M.A. Badalova, G.K. Ruzmatova

¹Agency for Chemical, Biological, Radiation, and Nuclear Safety of the National Academy of Sciences of Tajikistan, Dushanbe, Tajikistan

²Tajik Technical University named after Academician M.S. Osimi, Dushanbe, Republic of Tajikistan

The thermal stability and thermodynamic properties of thorium(IV) and uranyl crystal hydrates $\text{Th}(\text{NO}_3)_4 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$, $\text{UO}_2(\text{CH}_3\text{COO})_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ and $\text{UO}_2\text{SO}_4 \cdot 3.5\text{H}_2\text{O}$ were investigated in this work. The objective was to obtain data for optimizing uranium- and thorium-containing raw material processing technologies and predicting the properties of other actinide compounds. The studies were performed using derivatogravimetry, X-ray diffraction analysis and tensimetry under nonequilibrium and equilibrium conditions; each point on the barogram was maintained for over 36 hours to achieve equilibrium. The stepwise nature of dehydration and decomposition of the compounds was established. For $\text{Th}(\text{NO}_3)_4 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$, a five-step mechanism was revealed: the first four steps are the sequential loss of water (300–425 K), the fifth is decomposition to ThO_2 and nitrogen oxides (427–440 K). For $\text{UO}_2(\text{CH}_3\text{COO})_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$, four steps were recorded: removal of gases and moisture, dehydration, decomposition to UO_3 , acetone, and CO_2 (from 470 K). For $\text{UO}_2\text{SO}_4 \cdot 3.5\text{H}_2\text{O}$, two dehydration steps (325–420 K) and decomposition to UO_3 and SO_3 (480–710 K according to tensimetry, 630–1200 K according to DTA) were determined. The onset temperatures of the stages, as determined by tensimetry, are shifted to lower values by 50–70°C relative to the derivatogravimetry data. A comparative analysis revealed that $\text{UO}_2\text{SO}_4 \cdot n\text{H}_2\text{O}$ crystal hydrates are the most stable in the first two stages; for $\text{Th}(\text{NO}_3)_4 \cdot n\text{H}_2\text{O}$, increased bonding of water molecules with a decrease in their coordinate number was observed. The results are applicable to the development of raw material processing technologies and the prediction of the properties of related compounds.

Keywords: thorium(IV) nitrate, uranyl sulfate, and uranyl acetate crystallohydrates; dehydration; thermal decomposition; equilibria.

Введение

При технологических способах переработки урана и тория, содержащих минеральные руды и отходы промышленности, минеральные кислоты – серная, азотная могут образовывать различные по составу кристаллогидраты (в зависимости от температур обработки) и другие виды соединений [1-3].

Анализ литературных сведений показывает, что возможные химические превращения при термической обработке кристаллогидратных соединений тория и уранила изучены недостаточно [4-6]. Получение достоверных сведений по физико-химическим, термическим и термодинамическим свойствам продуктов переработки уран- и торий- содержащих материалов, в частности кристаллогидратов, позволяют на их основе подобрать наиболее эффективные условия технологии переработки сырья и получения конечных продуктов. На основе фундаментальных данных, можно установить закономерности изменения свойств аналогичных по составу соединений других актинидов, особенно для элементов второй половины актинидного ряда, где экспериментальное изучение имеет свои сложности, связанные с высокой радиоактивностью и малой доступностью этих элементов.

Экспериментальные методы. Результаты исследования.

В продолжении серии наших исследований, посвящённых термической устойчивости и термодинамическим характеристикам химических соединений [7-9], в данной работе приведены результаты сравнительного анализа термической стабильности, сведений о ступенчатом характере процесса термического разложения и термодинамических свойств кристаллогидратных соединений тория (IV) состава $\text{Th}(\text{NO}_3)_4 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$, уранила составов $\text{UO}_2(\text{CH}_3\text{COO})_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ и $\text{UO}_2\text{SO}_4 \cdot 3.5\text{H}_2\text{O}$ [10-12]. Исследование проведено с помощью прецизионных экспериментальных методов – дериватографии (дериватограф "Labsys Evo1600"), рентгеноструктурного анализа (XRDynamic 500) и тензиметрии с мембранным нуль-манометром [13,14] в двух условиях – неравновесных (дериватография, при скорости нагрева образца от одного до пятнадцати градусов в минуту) и равновесных (методом тензиметрии).

Методом тензиметрии с мембранным нуль-манометром установлено, что исследуемые процессы дегидратации кристаллогидратов и термического разложения солей тория и урана протекают замедленно во времени, особенно при процессе разложения солей. Для достижения равновесия в системе каждая фигуративная точка на графике зависимости давления пара от температуры (барограмма) выдерживалась более 36 часов. Достижение равновесия в системе проверялось как при прямом ходе барограммы (нагреве мембраны), так и при её обратном ходе (охлаждение системы). Совпадение обратного хода с прямым ходом барограммы удалось достичь только для процесса дегидратации кристаллогидратов.

«Ступенчатый характер процесса термического разложения кристаллогидратов тория (IV) и уранила установлен методом дериватографии. Показано, что процесс термического разложения пентагидрата нитрат тория (IV) (рисунок 1) в интервале температур (300 – 550) K состоит из пяти ступеней.

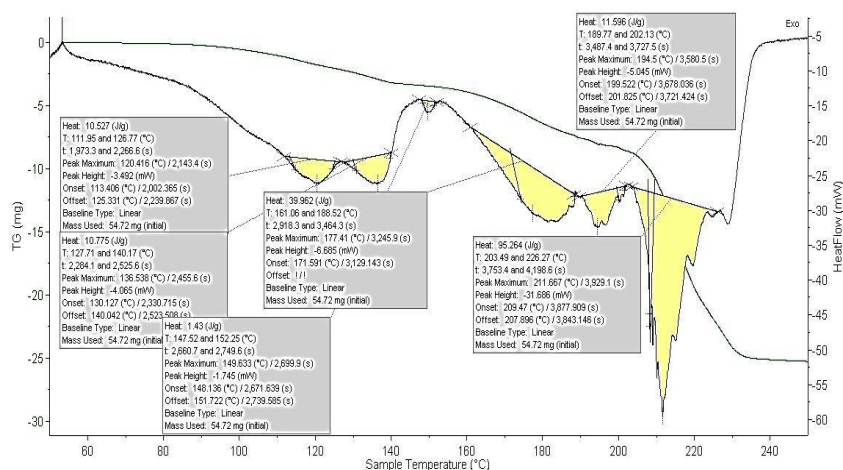


Рисунок 1 – Дериватограмма процесса термического разложения кристаллогидрата $\text{Th}(\text{NO}_3)_4 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$
 Figure 1 – Derivatogram of the thermal decomposition process of the $\text{Th}(\text{NO}_3)_4 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$ crystal hydrate

Методом тензиметрии с мембранным нуль-манометром [13-14] также установлен пятиступенчатый характер процесса термического разложения кристаллогидрата $\text{Th}(\text{NO}_3)_4 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$ в интервале температур 300-450 К при равновесных условиях (рисунок 2).

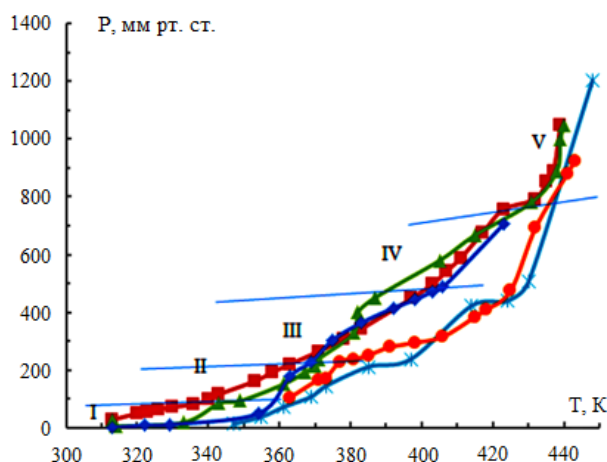
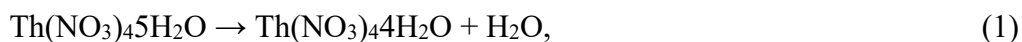


Рисунок 2 - Барограмма процесса термического разложения $\text{Th}(\text{NO}_3)_4 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$
 Figure 2 – Barogram of the thermal decomposition process

На основе полученных сведений можно предположить следующую схему дегидратации кристаллогидрата $\text{Th}(\text{NO}_3)_4 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$:

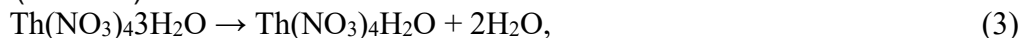
- на первой ступени интервал температур $\Delta T = (300-325)$ К и протекает следующая химическая реакция:



- вторая - при $\Delta T = (330-350)$ К по схеме:



- третья - при $\Delta T = (350-390)$ К по схеме:



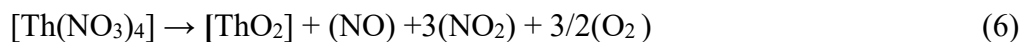
- четвёртая - при $\Delta T = (400-425)$ К по схеме:



На пятой ступени ($\Delta T = 427-440$ К) происходит термическое разложение $\text{Th}(\text{NO}_3)_4$, которое соответствует следующей химической реакции:



или



которое учитывает протекание процесса разложения

$(\text{NO}_2) \leftrightarrow (\text{NO}) + \frac{1}{2}(\text{O}_2)$ в условиях эксперимента, при относительно высоких температурах [15].
Образование газа - оксидов азота в мембранной камере наблюдается визуально» [16].

Методом дериватограмметрии установлено, что процесс термического разложения кристаллогидрата уранилацетата состава $\text{UO}_2(\text{CH}_3\text{COO})_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ в интервале температур от комнатной до 1000 °C состоит из трёх эндозэффектов (рисунок 3).

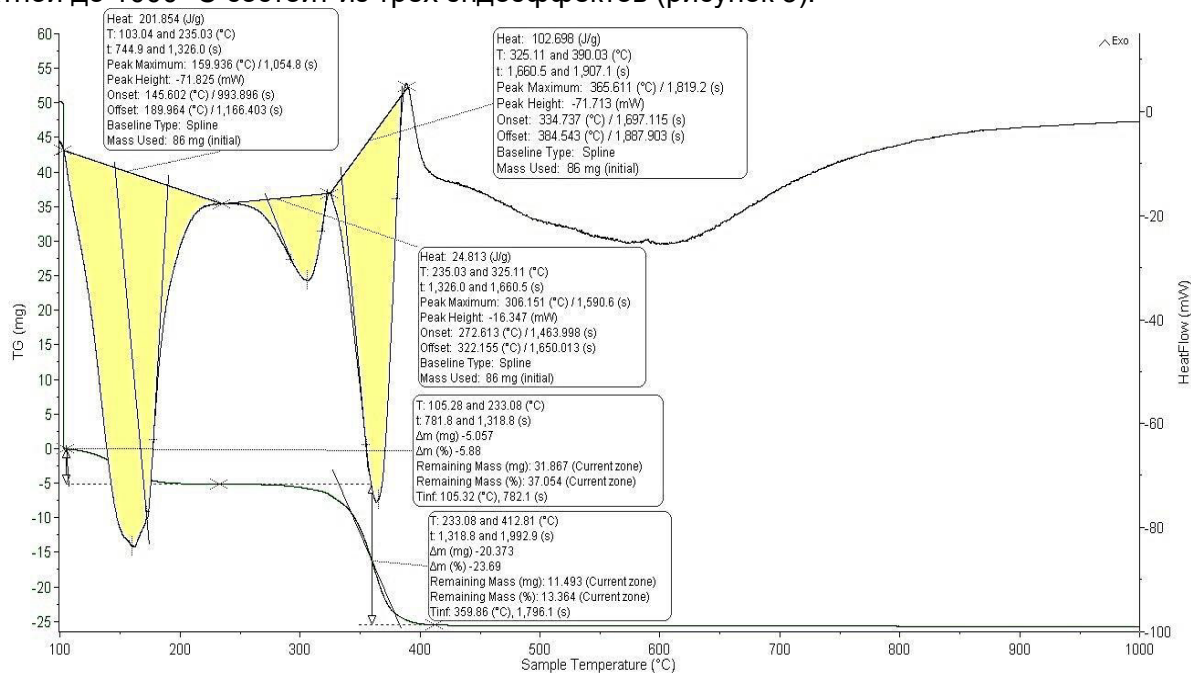


Рисунок 3 – Термограмма $\text{UO}_2(\text{CH}_3\text{COO})_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$: масса 86 мг; $t=1000^\circ\text{C}$; скорость нагрева 15 К/мин, 60 мин
Figure 3 – Thermogram of $\text{UO}_2(\text{CH}_3\text{COO})_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$: sample mass 86 mg; temperature 1000 °C; heating rate 15 K/min; duration 60 min

Методом тензиметрии установлено, что процесс термического разложения $\text{UO}_2(\text{CH}_3\text{COO})_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ состоит из четырёх ступеней (рисунок 4).

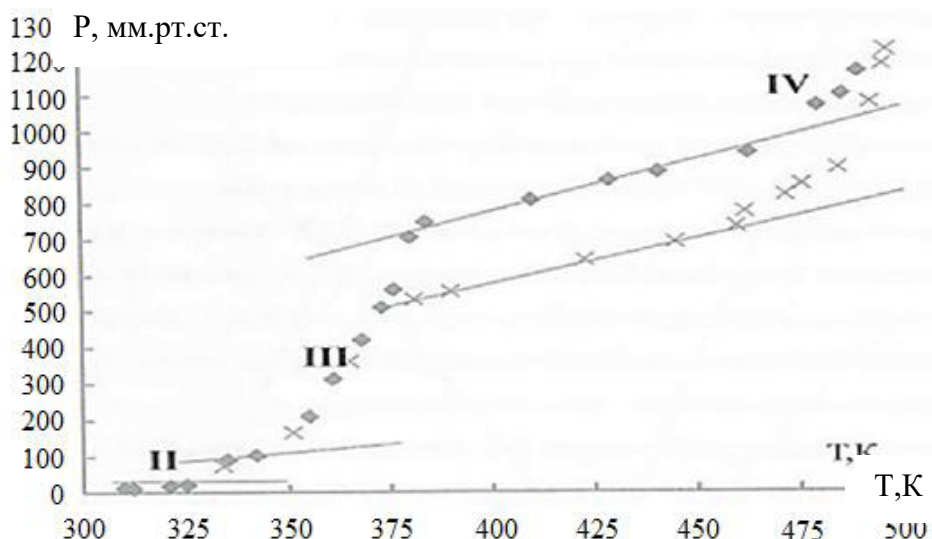
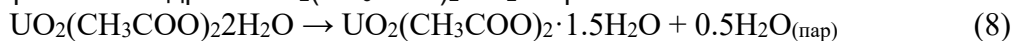


Рисунок 4 – График барограммы процесса термического разложения кристаллогидрата $\text{UO}_2(\text{CH}_3\text{COO})_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$
Figure 4 – Barogram curve of the thermal decomposition process of the $\text{UO}_2(\text{CH}_3\text{COO})_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ crystal hydrate

Первая ступень (I) протекает при температуре ниже 320 К и соответствует удалению физически адсорбированных газов, а также влаги из образца. Последующие две ступени, протекающие в интервале температур 320-345 К (II) и 350-380 К (III), соответствуют процессу дегидратации $\text{UO}_2(\text{CH}_3\text{COO})_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$. Прямые линии на барограмме соответствуют области газового расширения.

Количественный анализ барограммы показывает, что давление пара III ступени процесса почти в четыре раза больше, чем II ступени. На этом основании можно предположить, что первая ступень дегидратации (II) кристаллогидрата $\text{UO}_2(\text{CH}_3\text{COO})_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ протекает по схеме:

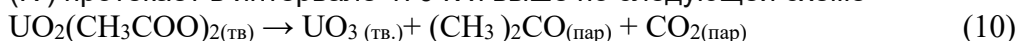


в интервале температур 320-345 К.

Третья ступень (III) протекает в интервале температур 350-380 К по схеме:



Четвёртая ступень (IV) протекает в интервале 470 К и выше по следующей схеме

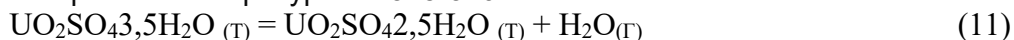


Образование ацетона по схеме (10) обнаружено по окончании эксперимента при вскрытии мембранной камеры.

Методом тензиметрии установлено, что процесс термического разложения кристаллогидрата $\text{UO}_2\text{SO}_4 \cdot 3.5\text{H}_2\text{O}$ в интервале температур 300-575 К (рисунок 5) протекает по следующей схеме:

первые две ступени соответствуют процессу дегидратации:

- первая ступень- в интервале температур $\Delta T = 325-370$ К



- вторая при $\Delta T = 380-420$ К



Третья ступень, протекающая в широкой области температур от 630 до 1200 К (по данным ДТА, в неравновесных условиях), и в интервале температур 480-710 К (по данным тензиметрии, в равновесных условиях) происходит термический распад уранилсульфата по уравнению:

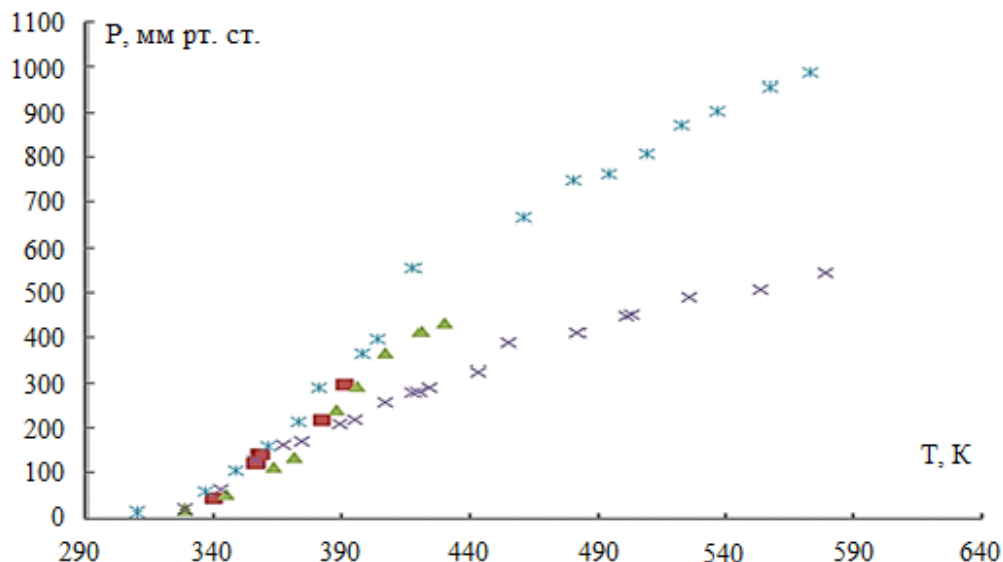


Рисунок 5 - Барограммы процесса парообразования $\text{UO}_2\text{SO}_4 \cdot 3.5\text{H}_2\text{O}$:

опыты - 1 ($\square$), 2 (Δ), 3 ($\times$) и 4 ($*$)

Figure 5 – Barograms of the vaporization process - 1 ($\square$), 2 (Δ), 3 ($\times$) и 4 ($*$)

Заклучение

Получены, таким образом, наиболее полные сведения термической устойчивости кристаллогидратных соединений тория (IV) и уранила, о многоступенчатом характере и температурном интервале протекания ступеней процессов дегидратации кристаллогидратов и термического разложения солей. Температура начала ступеней процессов, определённых в равновесных условиях (методом тензиметрии), смещена в области более низких температур (на 50-70 градусов) по сравнению с данными дериватографии.

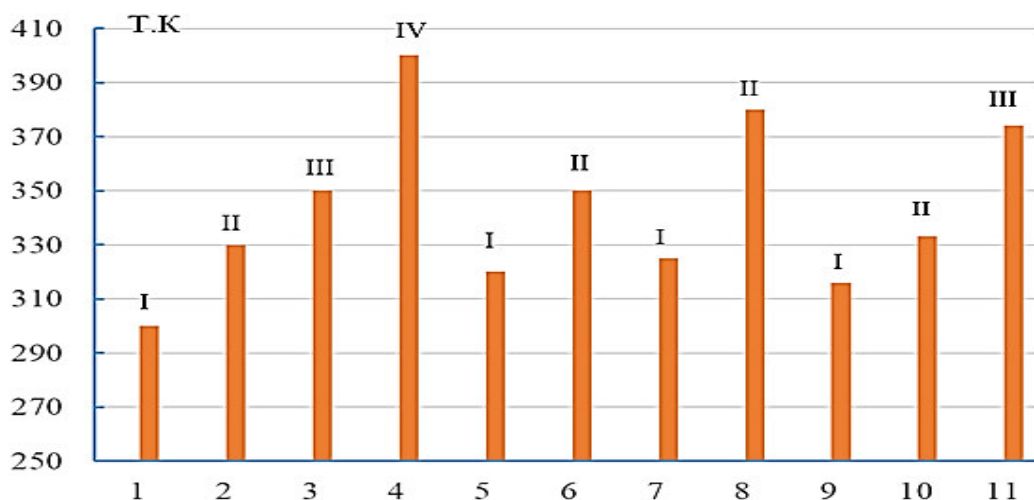


Рисунок 6 - Гистограмма температуры начала ступеней процесса дегидратации кристаллогидратов тория и уранила: (1-4) - $\text{Th}(\text{NO}_3)_4 \cdot n\text{H}_2\text{O}$;

(5,6) - $\text{UO}_2(\text{CH}_3\text{COO})_2 \cdot n\text{H}_2\text{O}$; (7,8) - $\text{UO}_2\text{SO}_4 \cdot n\text{H}_2\text{O}$; (9-11) - $\text{UO}_2(\text{NO}_3)_2 \cdot n\text{H}_2\text{O}$

Figure 6 – Histogram of the initial temperatures of the dehydration stages of thorium and uranyl crystal hydrates: (1-4) - $\text{Th}(\text{NO}_3)_4 \cdot n\text{H}_2\text{O}$; (5,6) - $\text{UO}_2(\text{CH}_3\text{COO})_2 \cdot n\text{H}_2\text{O}$; (7,8) - $\text{UO}_2\text{SO}_4 \cdot n\text{H}_2\text{O}$; (9-11) - $\text{UO}_2(\text{NO}_3)_2 \cdot n\text{H}_2\text{O}$

Полученные данные позволили провести сравнительный анализ термической устойчивости, изучить характеристики ступеней процессов дегидратации кристаллогидратов и солей тория (IV) и уранила. Гистограмма (рисунок 6) показывает, что по I и II ступеням относительно термически наиболее устойчивым являются кристаллогидраты $\text{UO}_2\text{SO}_4 \cdot n\text{H}_2\text{O}$. Для кристаллогидратов $\text{Th}(\text{NO}_3)_4 \cdot n\text{H}_2\text{O}$ по мере уменьшения координированного числа усиливается связь между молекулами воды, что возможно, связано с вхождением молекулы воды во внутреннюю сферу с образованием комплексного соединения $[\text{Th}(\text{NO}_3)_4 \cdot \text{H}_2\text{O}]$.

Рецензент: Обидов З.Р.-д.х.н., профессор кафедры "Технология химических производств" ТПУ имени академика М.С. Осими.

Литература

1. Сиборг, Г. Химия актинидных элементов / Г. Сиборг, Дж. Кац; пер. с англ.; под ред. Г.Н. Яковлева. – М.: Издательство Главного управления по использованию атомной энергии при Совете министров СССР, 1960. – 542 с.
2. Громов, В.Б. Введение в химическую технологию урана. Учебник для вузов. М.: Атомиздат, 1978, 336 с.
3. Жерин И.И., Амелина Г.Н. Химия тория, урана и плутония: Учебное пособие. Томск: Изд. ТПУ, 2010, 147 с.
4. Jing Li, Yan Chen, Yong Cai Zhang. Two thermolysis routes to ThO_2 nanoparticles from thorium nitrate. 2nd International Conference on Electronic & Mechanical Engineering and Information Technology (EMEIT-2012) - <https://www.atlantispress.com/article/3520.pdf>.
5. Sumanta Sahu, Uttam Kumar Sahu, and Raj Kishore Patel. Modified Thorium Oxide Polyaniline Core–Shell Nanocomposite and Its Application for the Efficient Removal of $\text{Cr}(\text{VI})$. Cite this: J. Chem. Eng. Data 2019, 64, 3, 1294–1304 Publication Date: February 20 - <https://doi.org/10.1021/acs.jced.8b01225>.
6. J. A. R. Cheda, Edgar F. Westrum, JR. Heat capacity of $\text{Th}(\text{NO}_3)_4 \cdot 4\text{H}_2\text{O}$ from 5 to 350 K. J. Chem. Thermodynamics 1976, V.8, P. 25-29.
7. Получение алюмогидридов щелочных металлов из местных руд Таджикистана и их термодинамическое обоснование / О. А. Азизов, И. Мирсаидзода, Х. А. Зоиров, А. Бадалов // Политехнический вестник. Серия: Инженерные исследования. – 2020. – № 3(51). – С. 62-66. – EDN TJUGQP.

8. Температура плавления лантанидов, интерметаллида Ln_5Pb_3 (где Ln - лантаниды) и закономерности их изменения / С. А. Гадоев, Б. Ш. Рахмонов, Б. Б. Эшов, А. Бадалов // Политехнический вестник. Серия: Инженерные исследования. – 2024. – № 4(68). – С. 92-98. – EDN GARZSE.
9. Насриддинов, С. К. Висмут - аналогия, термические характеристики его сплавов с лантанидами и закономерности их изменения / С. К. Насриддинов, Г. К. Рuzматова, А. Бадалов // Политехнический вестник. Серия: Инженерные исследования. – 2025. – № 3(71). – С. 69-77. – EDN URKIHT.
10. Мирсаидов У.М., Эшов Дж.Н., Хамидов Ф.А., Бадалов А.Б. Термодинамические характеристики процесса термического разложения $\text{Th}(\text{NO}_3)_4 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$. Журн. физической химии, 2024, т.98, №3, С.10-14.
11. Хамидов Ф.А., Эшов Дж. Н. Саломов Ф. Дж. Бадалов А. Раджабов С.Ф. Термическое разложение и термодинамические характеристики кристаллогидратов нитрата тория (iv). Вестник педагогического университета. Серия естественных наук. Изд. ТГПУ им. С Айни, 2025, №2 (26). С.98-206.
12. Бадалов А., Мирсаидзода И., Хамидов Ф.А., Саломов Ф. Дж., Эшов Дж. Н. Термическое разложение ураниловых соединений. Сб. тр. междуна. н.-пр. конф. "Химия и инженерная экология – XXIV" Казань, 27-28.09. 2024, ISBN 978-5-6050749-9-1. С.100-102.
13. Новиков, Г. И. Физические методы неорганической химии / Г. И. Новиков – Минск: Высшая школа, 1975. – 261 с.
14. Суворов, А. В. Термодинамическая химия парообразного состояния / А. В. Суворов. - Л.: Химия, 1970. – 208 с.
15. Атрощенко, В.И. Технология азотной кислоты/ В.И. Атрощенко, С.И. Каргин. – М.: Химия, 1970. - С.89-102.
16. Эшов Дж. Н. Синтез, термические и термодинамические свойства торий-ураниловых соединений. Дисс. к.т.н., Душанбе, 2025, 145 с.

References

1. Seaborg, G. T., & Katz, J. J. (1960). The Chemistry of the Actinide Elements (Russian edition, Trans. from English, G. N. Yakovlev, Ed.). Moscow: Publishing House of the Main Administration for the Use of Atomic Energy under the Council of Ministers of the USSR. [In Russian]
2. Gromov, V. B. (1978). Introduction to the Chemical Technology of Uranium: Textbook for Universities. Moscow: Atomizdat. [In Russian]
3. Zherin, I. I., & Amelina, G. N. (2010). Chemistry of Thorium, Uranium, and Plutonium: Study Guide. Tomsk: TPU Publishing House. [In Russian]
4. Jing Li, Yan Chen, & Yong Cai Zhang. (2012). Two thermolysis routes to ThO_2 nanoparticles from thorium nitrate. 2nd International Conference on Electronic & Mechanical Engineering and Information Technology (EMEIT-2012). <https://www.atlantispress.com/article/3520.pdf>
5. Sahu, S., Sahu, U. K., & Patel, R. K. (2019). Modified Thorium Oxide Polyaniline Core–Shell Nanocomposite and Its Application for the Efficient Removal of Cr(VI) . Journal of Chemical & Engineering Data, 64(3), 1294–1304. <https://doi.org/10.1021/acs.jced.8b01225>
6. Cheda, J. A. R., & Westrum, E. F., Jr. (1976). Heat capacity of $\text{Th}(\text{NO}_3)_4 \cdot 4\text{H}_2\text{O}$ from 5 to 350 K. The Journal of Chemical Thermodynamics, 8(1), 25-29.
7. Azizov, O. A., Mirsaidzoda, I., Zoirov, Kh. A., & Badalov, A. (2020). Production of alkali metal aluminum hydrides from local ores of Tajikistan and their thermodynamic substantiation. Polytechnical Bulletin. Series: Engineering Studies, (3), 62-66. [In Russian]. EDN: TJUGQP
8. Gadoev, S. A., Rakhmonov, B. Sh., Eshov, B. B., & Badalov, A. (2024). Melting point of lanthanides, intermetallic compound Ln_5Pb_3 (where Ln are lanthanides) and regularities of their changes. Polytechnical Bulletin. Series: Engineering Studies, (4), 92-98. [In Russian]. EDN: GARZSE
9. Nasriddinov, S. K., Ruzmatova, G. K., & Badalov, A. (2025). Bismuth - analogy, thermal characteristics of its alloys with lanthanides and regularities of their changes. Polytechnical Bulletin. Series: Engineering Studies, (3), 69-77. [In Russian]. EDN: URKIHT
10. Mirsaidov, U. M., Eshov, Dzh. N., Khamidov, F. A., & Badalov, A. B. (2024). Thermodynamic characteristics of the thermal decomposition of $\text{Th}(\text{NO}_3)_4 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$. Russian Journal of Physical Chemistry A, 98(3), 10-14. (Note: If citing the Russian version of the journal: Zhurnal Fizicheskoi Khimii, 2024, Vol. 98, No. 3, pp. 10-14).
11. Khamidov, F. A., Eshov, Dzh. N., Salomov, F. Dzh., Badalov, A., & Radzhabov, S. F. (2025). Thermal decomposition and thermodynamic characteristics of crystalline hydrates of thorium (IV) nitrate. Bulletin of the Pedagogical University. Series of Natural Sciences (TSPU named after S. Ayni), (2), 98-206.
12. Badalov, A., Mirsaidzoda, I., Khamidov, F. A., Salomov, F. Dzh., & Eshov, Dzh. N. (2024). Thermal decomposition of uranyl compounds. In Proceedings of the XXIV International Scientific and Practical Conference "Chemistry and Engineering Ecology – XXIV" (pp. 100-102). Kazan. ISBN 978-5-6050749-9-1.
13. Novikov, G. I. (1975). Physical Methods of Inorganic Chemistry. Minsk: Vysshaya Shkola.
14. Suvorov, A. V. (1970). Thermodynamic Chemistry of the Vapor State. Leningrad: Khimiya.

15. Atroshchenko, V. I., & Kargin, S. I. (1970). Technology of Nitric Acid (pp. 89-102). Moscow: Khimiya.
16. Eshov, Dzh. N. (2025). Synthesis, thermal and thermodynamic properties of thorium-uranyl compounds (Candidate's thesis, Engineering Sciences). Dushanbe.

МАЪЛУМОТ ДАР БОРАИ МУАЛЛИФОН-СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ-INFORMATION ABOUT AUTHORS

TJ	RU	EN
Саломов Фирдавс Чабборович	Саломов Фирдавс Джабборович	Salomov Firdavs Dzhabborovich
унвонҷӯ	соискатель	applicant
Агентии беҳатарии химиявӣ, биологӣ, радиатсионӣ ва ядроии Академияи миллии илмҳои Тоҷикистон	Агентства по химической, биологической, радиационной и ядерной безопасности Национальной академии наук Таджикистана	Agency for Chemical, Biological, Radiation and Nuclear Safety of the National Academy of Sciences of Tajikistan
E-mail: fr.0.5@mail.ru		
TJ	RU	EN
Исломова Муқаддам Саъдуллоевна	Исломова Муқаддам Саъдуллоевна	Islomova Mukaddam Sadulloevna
н.и.т., дотсент	к.т.н., доцент	candidate of engineering sciences, Assistant professor
ДТТ ба номи академик М.С. Осимӣ	ТТУ имени академика М.С.Осими	TTU named after academician M.S. Osimi
E-mail: islomova.muqaddam71@gmail.com		
TJ	RU	EN
Бадалова Мамлакат Абдухайровна	Бадалова Мамлакат Абдухайровна	Badalova Mamlakat Abdukhayrovna
н.и.т., и.в. дотсент	к.т.н., и.о. доцента	candidate of engineering sciences, associate professor
ДТТ ба номи академик М.С. Осимӣ	ТТУ имени академика М.С. Осими	TTU named after academician M.S. Osimi
E-mail: bmamlakat@gmail.com		
TJ	RU	EN
Рузматова Гулноз Камоловна	Рузматова Гулноз Камоловна	Ruzmatova Gulnoz Kamolovna
н.и.х., муаллими калон	к.х.н., ст. преподаватель	PhD, senior lecturer
ДТТ ба номи академик М.С. Осимӣ	ТТУ имени академика М.С. Осими	TTU named after academician M.S. Osimi
E-mail: ruzmatova066@gmail.com		

ИСПЫТАНИЯ ИЗМЕЛЬЧЁННОЙ МИНЕРАЛЬНОЙ СМЕСИ МУСКОВИТА МЕСТОРОЖДЕНИЯ КУРГОВАТ ТАДЖИКИСТАНА

¹Ф.Б. Мирзозода, ²Азим Иброхим

¹ Институт водных проблем, гидроэнергетики и экологии НАН Таджикистана, Душанбе, Таджикистан

² Министерство транспорта Республики Таджикистан, Душанбе, Таджикистан

В статье представлены результаты исследований деформационных и прочностных свойств измельченных силикатных отходов, полученных после комплексной переработки минерала мусковит месторождения Курговат Таджикистана. На основе полученных компрессионных данных установлена умеренная сжимаемость материала. Полная вертикальная деформация при максимальном давлении 0,30 МПа составила 0,76 мм (3,04 % от начальной высоты образца). Интенсивная осадка на начальных ступенях нагружения обусловлена переупаковкой и параллельной ориентацией пластинчатых чешуек слюды. В ходе сдвиговых испытаний зафиксирован закономерный рост сопротивления сдвигу при увеличении нормального давления от 0,10 до 0,30 МПа. Построена линейная зависимость прочности, по которой определены основные механические параметры исследуемой дисперсной системы: удельное сцепление смеси составило 0,02 МПа, а угол внутреннего трения равен 32°. Показано, что отсутствие жестких цементационных связей между измельченными частицами обуславливает высокую деформируемость и умеренную прочность смеси на сдвиг.

Ключевые слова: минерал мусковит и силикатные отходы, система АСИС, компрессионные испытания, одноплоскостной сдвиг и деформация, безотходные технологии.

ОЗМОИШҶОИ ОМЕХТАИ МАЪДАНИИ МАЙДАКАРДАШУДАИ МУСКОВИТИ КОНИ КУРГОВАТИ ТОҶИКИСТОН

Ф.Б. Мирзозода, Азим Иброҳим

¹ Институти масъалаҳои об, гидроэнергетика ва экологияи АМИТ, ш.Душанбе, Ҷумҳурии Тоҷикистон

² Вазорати нақлиёти Ҷумҳурии Тоҷикистон, ш.Душанбе, Республика Таджикистан

Дар мақола натиҷаҳои тадқиқоти ҳосиятҳои деформатсионӣ ва мустаҳкамии партовҳои силикати резакардашуда, ки пас аз коркарди комплекси минерали мусковити кони Курговати Тоҷикистон ба даст омадаанд, оварда шудаанд. Дар асоси маълумоти компрессионии бадастомадаи фишурдашавии муътадили материал муайян карда шуд. Деформатсияи пурраи амудӣ ҳангоми фишори максималии 0,30 МПа 0,76 мм (3,04 % аз баландии аввалии намуна)-ро таъшиқ дод. Нишастии бошиддат дар зинаҳои аввали боргузорӣ бо сабаби азнавҷойгиршавӣ ва самти мувозии пулакчаҳои лавҳашакли слюда ба амал омадааст. Дар рафти озмоишҳои лағзиш афзоиши қонунии муқовимат ба лағзиш ҳангоми зиёд шудани фишори нормалӣ аз 0,10 то 0,30 МПа ба қайд гирифта шуд. Вобастагии ҳаттии мустаҳкамӣ сохта шуд, ки тавассути он параметрҳои асосии механикии системаи дисперсии тадқиқшаванда муайян карда шуданд: ҳаспҳои ҳоси омехта 0,02 МПа ва қунҷи соиши дохилӣ ба 32° баробар шуд. Нишон дода шудааст, ки набудани алоқаҳои сахти сементатсионӣ дар байни зарраҳои резакардашуда боиси деформатсияи баланд ва мустаҳкамии муътадили омехта ба лағзиш мегардад.

Калидвожаҳо: минерали мусковит ва партовҳои силикатӣ, системаи АСИС, озмоишҳои компрессионӣ, лағзиши яктестура ва деформатсия, технологияҳои бепартов.

TESTING OF CRUSHED MUSCOVITE MINERAL MIXTURE FROM THE KURGOVAT DEPOSIT OF TAJIKISTAN

F.B. Mirzozoda, Azim Ibrohim

¹ Institute of Water Problems, Hydropower and Ecology of the National Academy of Sciences of Tajikistan, Dushanbe, Tajikistan

² Ministry of Transport of the Republic of Tajikistan, Dushanbe, Tajikistan

The paper presents the results of investigations into the deformation and strength properties of crushed silicate waste obtained after the complex processing of the muscovite mineral from the Kurgovat deposit in Tajikistan. Based on the obtained compression data, a moderate compressibility of the material was established. The total vertical deformation at a maximum pressure of 0.30 MPa was 0.76 mm (3.04% of the initial sample height). Intensive settlement at the initial loading stages is due to the repacking and parallel orientation of the platy mica flakes. During shear tests, a regular increase in shear resistance was recorded with an increase in normal pressure from 0.10 to 0.30 MPa. A linear strength relationship was constructed, from which the main mechanical parameters of the studied disperse system were determined: the specific cohesion of the mixture was 0.02 MPa, and the internal friction angle was equal to 32°. It is shown that the absence of rigid cementation bonds between the crushed particles causes high deformability and moderate shear strength of the mixture.

Keywords: muscovite mineral and silicate waste, ASIS system, compression tests, direct shear and deformation, waste-free technologies.

Введение

В последние годы в химической промышленности Республики Таджикистан проводятся широкомасштабные мероприятия по выпуску экспортоориентированной и конкурентоспособной продукции, что приводит к значительным научным и практическим результатам. В рамках инициативы Лидера нации, уважаемого Эмомали Рахмона объявленные 2022–2026 годы «Годами развития промышленности» ставится задача продолжить реализацию индустриальной политики, направленной на обеспечение стабильности национальной экономики, увеличение доли промышленности в валовом внутреннем продукте и рост объемов производства.

В этом контексте проводится ряд исследований по комплексной переработке местного минерального сырья и внедрению безотходных технологий. Одним из таких видов сырья является минерал мусковит. После его переработки и извлечения основных компонентов остаются силикатные отходы, содержащие около 43,6% оксида кремния, а также другие сопутствующие элементы [1]. С физико-химической точки зрения мусковит представляет собой слоистый алюмосиликат калия. Высокое содержание диоксида кремния и оксида алюминия в остаточных силикатных отходах переработки делает их ценным аморфно-кристаллическим сырьем [2].

В технологии вяжущих веществ такие отходы способны выступать в роли активной минеральной добавки, проявляющей пуццолановые свойства при взаимодействии с гидроксидом кальция в процессе гидратации цемента [3]. Кроме того, высокая термическая стабильность кристаллической решетки слюды и её способность выдерживать резкие тепловые перепады без разрушения структуры создают предпосылки для термомеханического синтеза муллитоподобных фаз, необходимых для производства огнеупорных материалов [4, 5]. В связи с этим актуальной задачей является проведение комплекса анализов прочностных и деформационных характеристик данных отходов с целью их дальнейшего использования в производстве цемента, огнеупоров и другой востребованной продукции.

Материалы и методы испытания

Исследование деформационных и прочностных свойств измельчённой грунтовой смеси минерала мусковита месторождения Курговат после дробления выполнялось в лабораторных условиях на автоматизированной системе испытаний грунтов (прибор АСИС). Прибор использовался для двух видов тестов: компрессионного сжатия и одноплоскостного сдвига. Это позволило одновременно оценить, как минеральная смесь уплотняется под действием вертикальной нагрузки и как она сопротивляется разрушению при сдвиге.

Подготовка образцов и методика компрессионных испытаний.

Перед началом опыта материал был высушен до воздушно-сухого состояния, просеян и тщательно перемешан до получения однородной массы. Средняя влажность смеси составляла около 3,2 %. Образец помещали в рабочую камеру прибора и слегка уплотняли для устранения крупных пустот между частицами. Это необходимо, так как при излишне рыхлой укладке начальные деформации отражали бы не реальные свойства смеси, а лишь её первичное оседание. Слюда в данной системе выступает в роли пластинчатого и подвижного компонента.

Компрессионное испытание проводилось ступенчато. На образец последовательно подавали вертикальное давление в диапазоне от 0,05 до 0,30 МПа, фиксируя величину вертикальной деформации на каждой ступени.

Методика испытаний на сдвиг. Испытания на сдвиг также выполнялись на приборе АСИС. Образец помещали в срезную коробку, после чего к нему прикладывали заданное нормальное давление. Затем создавали горизонтальное усилие, которое постепенно увеличивали до момента разрушения (сдвига) образца. Для проведения экспериментов были выбраны нормальные давления, равные 0,10, 0,20 и 0,30 МПа. На каждой ступени фиксировалось максимальное сопротивление сдвигу. Такой подход позволяет построить линейную зависимость между нормальным напряжением и прочностью материала на сдвиг.

Результаты и обсуждение

Результаты компрессионных испытаний. Согласно полученным данным, общая вертикальная деформация при максимальном давлении 0,30 МПа составила 0,76 мм, что эквивалентно примерно 3,04 % от начальной высоты образца. На начальных этапах нагружения деформация развивалась наиболее интенсивно. При дальнейшем росте давления плотность смеси увеличивалась, вследствие чего прирост осадки (деформации) постепенно затухал (табл. 1).

Таблица 1 – Результаты компрессионного испытания
Table 1 – Results of the compression test

Вертикальное давление, МПа	Вертикальная деформация, мм	Относительная деформация, %	Коэффициент Уплотнения, 1/МПа	Модуль общей деформации, МПа	Разновидность грунта по деформируемости (ГОСТ 25100-2020)
0,05	0,18	0,007	0,29	4,1	очень сильно деформируемые
0,10	0,33	0,013	0,24	5,0	очень сильно деформируемые
0,20	0,57	0,023	0,19	6,3	сильно деформируемые
0,30	0,76	0,030	0,15	7,9	сильно деформируемые

График наглядно иллюстрирует характер сжимаемости измельченных силикатных отходов в заданном диапазоне нагрузок. Компрессионная кривая отражает изменение относительной деформации образца при ступенчатом увеличении вертикального давления до 0,30 МПа. Высокая скорость осадки на первых ступенях нагружения объясняется механической переупаковкой дисперсных частиц и параллельной ориентацией пластинчатых чешуек мусковита. При максимальном давлении деформация стабилизируется и составляет 3,04 %. Анализ графика зависимости относительной деформации от вертикального давления показывает, что материал обладает умеренной сжимаемостью. При этом кривая имеет выраженный нелинейный характер: наиболее интенсивный рост деформации фиксируется на начальном этапе нагружения (до 0,10–0,15 МПа), после чего график выполаживается, что свидетельствует о постепенном уплотнении структуры смеси (рис. 1).

Компрессионные испытания показали, что исследуемый материал обладает умеренной сжимаемостью. График деформации подтверждает, что материал не проявляет свойств высокопористого рыхлого грунта, но и не является абсолютно жестким. Высокая скорость осадки на первых этапах объясняется переупаковкой частиц, сокращением порового пространства и ориентацией чешуек слюды перпендикулярно направлению нагрузки. В дальнейшем частицы сближаются, увеличивая площадь контактов, и смесь эффективнее сопротивляется последующему уплотнению (табл. 1, рис. 1).

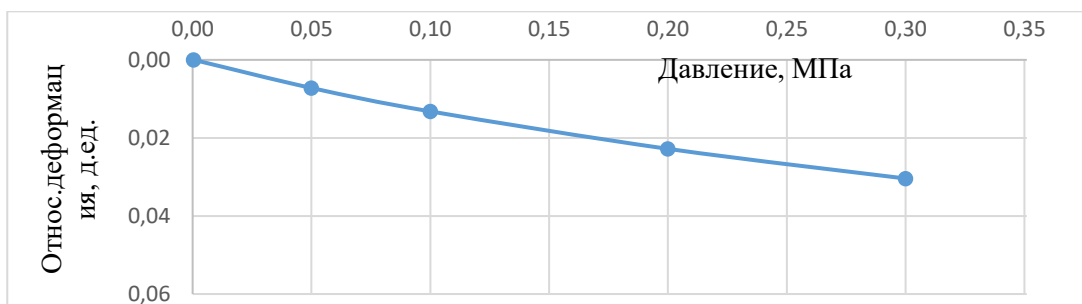


Рисунок 1 – Зависимость относительной деформации от вертикального давления
Figure 1 – Relative deformation vs. vertical pressure

Результаты испытаний на сдвиг. На рис. 2 приведена зависимость предельного сопротивления сдвигу от нормального давления, полученная по результатам одноплоскостных сдвиговых испытаний смеси в диапазоне нагрузок от 0,10 до 0,30 МПа. Прямолинейный характер графика подтверждает закономерный рост сопротивления сдвигу при увеличении нормального

давления. Графическим путем определены основные прочностные параметры дисперсной системы: угол внутреннего трения, составивший 32° , и удельное сцепление смеси 0,02 МПа. Невысокое значение удельного сцепления 0,02 МПа указывает на отсутствие жестких цементационных связей между частицами мусковита. При этом относительно высокий угол внутреннего трения 32° обусловлен шероховатостью измельченных частиц и эффектом заклинивания пластинчатых чешуек слюды при росте нормального давления.



Рисунок 2 – График зависимости предельного сопротивления сдвигу от нормального давления
Figure 2 – Shear strength vs. normal pressure

Выявленный характер деформирования измельченной смеси мусковита обусловлен выраженной анизотропией свойств слоистых минералов. Высокая сжимаемость (3,04 % от начальной высоты) на первых ступенях нагружения связана с упругим изгибом и сдвигом миканитовых чешуек относительно друг друга. При давлении до 0,10 МПа преодолевается хаотичное пространственное расположение частиц, и происходит их вынужденная плоскопараллельная ориентация (текстурирование). С завершением этого процесса при давлениях выше 0,10 МПа деформационные изменения замедляются, а контактная площадь между чешуйками существенно возрастает. Это приводит к мобилизации сил сухого трения на границах раздела фаз, что выражается в линейном росте сопротивления сдвигу при дальнейшем увеличении нормальной нагрузки (рис. 2).

Полученные значения демонстрируют закономерный рост сопротивления сдвигу с увеличением нормального давления. При нормальном давлении 0,10 МПа сопротивление сдвигу составило 0,082 МПа, а при давлении 0,30 МПа оно возросло до 0,207 МПа. Последующее возрастание давления до 0,30 МПа вызывает лишь незначительное сближение уже ориентированных слоев без разрушения самих кристаллических пластин. Сформированная таким образом плотная плоскопараллельная структура предопределяет умеренную прочность дисперсной системы на сдвиг при практически полном отсутствии сцепления (табл. 2). Вследствие такой переупаковки свободный объем пор между чешуйками слюды минимизируется, и материал переходит в более стабильное квазиоднородное состояние. Дальнейшее сопротивление смеси внешнему воздействию начинает полностью определяться внутренним трением ориентированных частиц.

Таблица 2 – Результаты испытания на одноплоскостной сдвиг
Table 2 – Direct shear test results

Вертикальная нагрузка, МПа	Касательная нагрузка, МПа	Сцепление, МПа	Угол внутреннего трения, град.
0,10	0,082	0,02	32
0,20	0,145		
0,30	0,207		

Комплексный анализ деформационных и прочностных свойств измельченных силикатных отходов мусковита позволил установить характер их механического поведения под нагрузкой. Согласно компрессионным испытаниям (рис. 1), материал обладает умеренной сжимаемостью с выраженной нелинейностью на начальном этапе (до 0,10 МПа), вызванной плоскопараллельной переориентацией пластинчатых чешуек слюды. Результаты одноплоскостного сдвига (рис. 2) подтверждают, что сформированная текстурированная структура обеспечивает закономерный рост сопротивления сдвигу за счет сил трения 32° при слабом удельном сцеплении 0,02 МПа. Отсутствие жестких цементационных связей между частицами предопределяет высокую деформируемость смеси, что необходимо учитывать при разработке безотходных технологий и вторичном использовании данных отходов в строительной индустрии.

Результаты сдвиговых испытаний отражают классическую тенденцию, характерную для всех зернистых и дисперсных минеральных материалов: с усилением прижатия частиц друг к другу возрастает межчастичное трение, что требует больших усилий для их взаимного смещения. Значение угла внутреннего трения указывает на то, что после завершения фазы уплотнения сопротивление сдвигу начинает определяться преимущественно силами зацепления шероховатых кромок измельченных кристаллов и базовым трением гладких базисных плоскостей слюды. Низкое удельное сцепление научно доказывает отсутствие капиллярного или химического связывания (отсутствие цементационной матрицы), что подтверждает дисперсный статус материала. Тем не менее, для дисперсной смеси на основе слюды такие значения вполне закономерны.

Заключение

В целом результаты испытаний показали, что измельчённая минеральная смесь относится к сильнодеформируемым материалам и обладает умеренной прочностью на сдвиг. С точки зрения дальнейшего использования в производстве цементного клинкера и огнеупорных материалов, высокая деформируемость материала при компрессии является технологическим преимуществом. Она облегчает процессы сухого или мокрого прессования шихты, повышая плотность сырца перед обжигом. При этом в интервале температур 800–1000 °С в процессе дегидратации мусковита происходит разрушение его гидроксильных групп, что активизирует фазовые переходы с образованием термостойких кристаллических фаз (муллита и кристобалита), обеспечивающих высокую механическую прочность готового огнеупорного или цементного камня. Таким образом, на основе изученных физико-механических свойств отходов переработки мусковита была обоснована и разработана технология их утилизации для нужд цементного и огнеупорного производств.

Рецензент: Рузиев Дж.Р. – д.т.н., профессор Таджикского национального университета.

Литература

1. Дудеров, И.Г. Общая технология силикатов / И.Г. Дудеров, Г.М. Матвеев, В.Б. Суханова. – М.: Стройиздат, 1987. – 560 с.
2. Бутт, Ю.М. Химическая технология вяжущих материалов / Ю.М. Бутт, М.М. Сычев, В.В. Тимашев. – М.: Стройиздат, 1983. – 438 с.
3. Алексеев, Б.В. Технология производства цемента / Б.В. Алексеев. – М.: Высшая школа, 1980. – 264 с.
4. Верней, И.И. Технология асбестоцементных изделий / И.И. Верней, В.М. Колбасов. – М.: Стройиздат, 1985. – 400 с.
5. Волженский, А.В. Минеральные вяжущие вещества / А.В. Волженский. – М.: Стройиздат, 1986. – 464 с.

References

1. Duderov, I.G. General Technology of Silicates / I.G. Duderov, G.M. Matveev, V.B. Sukhanova. – Moscow: Stroyizdat, 1987. – 560 p.
2. Butt, Yu.M. Chemical Technology of Binding Materials / Yu.M. Butt, M.M. Sychev, V.V. Timashev. – Moscow: Stroyizdat, 1983. – 438 p.
3. Alekseev, B.V. Technology of Cement Production / B.V. Alekseev. – Moscow: Vysshaya Shkola, 1980. – 264 p.
4. Vernei, I.I. Technology of Asbestos-Cement Products / I.I. Vernei, V.M. Kolbasov. – Moscow: Stroyizdat, 1985. – 400 p.
5. Volzhensky, A.V. Mineral Binding Materials / A.V. Volzhensky. – Moscow: Stroyizdat, 1986. – 464 p.

МАЪЛУМОТ ДАР БОРАИ МУАЛЛИФОН - СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ- INFORMATION ABOUT AUTHORS

RU	TJ	EN
Мирзозода Фарход Баходур соискатель	Мирзозода Фарход Баходур унвончӯ	Mirzozoda Farhod Bahodur applicant
Институт водных проблем, гидроэнергетики и экологии НАН Таджикистана	Институти масъалаҳои об, гидроэнергетика ва экологияи АМИ Тоҷикистон farhodpiurr@mail.ru	Institute of Water Problems, Hydropower and Ecology of the NAS of Tajikistan
RU	TJ	EN
Азим Иброҳим	Азим Иброҳим	Azim Ibrohim
кандидат технических наук, академик МИА	номзади илмҳои техникӣ, академики АМБ	candidate of technical sciences, academic IAE
Министерство транспорта Республики Таджикистан	Вазорати нақлиёти Ҷумҳурии Тоҷикистон	Ministry of Transport of the Republic of Tajikistan

КАТАЛИТИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА ЖЕЛЕЗНЫХ ОКСИДНЫХ СИСТЕМ В ГЕТЕРОГЕННОМ СИНТЕЗЕ АММИАКА

¹З.Х. Гайбуллаева, ²Т.Х. Гадоев

¹Таджикский технический университет имени академика М.С. Осими, г. Душанбе, Республика Таджикистан
²ОАО «Азот», г. Леваканд, Республика Таджикистан

В работе изучены каталитические свойства железооксидных катализаторов в вюститной модификации железа в процессе гетерогенного синтеза аммиака. Рассмотрено влияние структурообразующих и активирующих промоторов (Al_2O_3 , K_2O) и добавки CoO на удельную поверхность, константу скорости реакции и удельную каталитическую активность катализаторов. Установлено, что оптимальное содержание Al_2O_3 и K_2O составляет 15 мас. % и 5 мас. % соответственно, а добавка CoO в количестве ~5 мас. % обеспечивает максимальную активность железного катализатора. Установлено, что оптимальная температура процесса Габера-Боша с применением данного катализатора составляет около 450 °C.

Ключевые слова: катализатор, вюстит, аммиак, промоторы, каталитическая активность, удельная поверхность, низкотемпературный синтез.

ХУСУСИЯТҲОИ КАТАЛИТИКИИ СИСТЕМАҲОИ ОКСИДИ ОҶАНӢ ДАР СИНТЕЗИ ГЕТЕРОГЕНИИ АММИАК

¹З.Х. Гайбуллаева, ²Т.Х. Гадоев

¹Донишгоҳи техникии Тоҷикистон ба номи академик М.С. Осимӣ, ш. Душанбе, Ҷумҳурии Тоҷикистон
²ҚСҚ «Азот», ш. Леваканд, Ҷумҳурии Тоҷикистон

Дар корҳои анҷомдодашуда, хусусиятҳои каталитикии катализаторҳои оҳануоксидии модификасияи вюстити оҳан дар синтези раванди гетерогении аммиак (NH_3) омӯхта шудаанд. Таъсири промоторҳои сохторӣ ва фаъолкунанда (Al_2O_3 , K_2O) ва иловаи CoO ба масоҳати махсус, константаи суръати реаксия ва фаъолияти каталитикии махсуси катализаторҳо мавриди таҳлил қарор гирифт. Муайян карда шуд, ки миқдори оптималии Al_2O_3 ва K_2O мутаносибан 15 мас.% ва 5 мас.% аст, дар ҳоле ки иловаи CoO дар миқдори ~5 мас.% баландтарин фаъолияти катализаторро таъмин менамояд. Муайян карда шуд, ки ҳарорати оптималии раванди Габер-Бош бо истифодаи катализатори мазкур тақрибан 450 °C мебошад.

Калимаҳои калидӣ: катализатор, вюстит, аммиак, промоторҳо, фаъолияти каталитикӣ, масоҳати махсус, синтези пастҳароратӣ.

CATALYTIC PROPERTIES OF IRON OXIDE SYSTEMS IN THE HETEROGENEOUS SYNTHESIS OF AMMONIA

¹Z.H. Gaibullaeva, ²T.Kh. Gadoev

¹Tajik Technical University named after Academician M.S. Osimi, Dushanbe, Republic of Tajikistan
²Open Joint Stock Company “Azot”, Levakant, Republic of Tajikistan

The study investigates the catalytic properties of iron oxide catalysts in the form of wüstite of iron in the heterogeneous synthesis of ammonia. The effects of structure-forming and activating promoters (Al_2O_3 , K_2O) and the addition of CoO on the specific surface area, reaction rate constant, and specific catalytic activity of the catalysts were examined. It was found that the optimal contents of Al_2O_3 and K_2O are 15 wt.% and 5 wt.%, respectively, while the addition of approximately 5 wt.% CoO ensures the maximum activity of the iron catalyst. It was determined that the optimal temperature for the Haber–Bosch process with this catalyst is approximately 450 °C.

Keywords: catalyst, wüstite, ammonia, promoters, catalytic activity, specific surface area, low-temperature synthesis.

Введение

Аммиак (NH_3) является ключевым химическим веществом благодаря своей роли в производстве минеральных удобрений [1,2]. Кроме того, аммиак привлекает внимание как потенциальный энергоноситель и компонент водородной экономики, электротоплива (e-fuel) и технологий хранения энергии, благодаря высокому содержанию водорода (H_2), необходимого для генерации водорода по требованию в топливных элементах [3–7].

В Таджикистане производство аммиака осуществляется на крупном химическом предприятии — ОАО «Азот», которое является важной частью химической промышленности страны и поставщиком азотных удобрений для сельского хозяйства. Получаемый аммиак служит сырьём для производства различных видов минеральных удобрений, что определяет необходимость совершенствования технологий синтеза и повышения эффективности катализаторов.

Исторически поиск эффективных катализаторов аммиака начался с работ Ф. Габера, К. Боша и Г. Ван Оордта. Было установлено, что реакцию синтеза аммиака катализируют металлы VI–VIII групп Периодической системы, включая железо, марганец, молибден, вольфрам, платину и рутений. Наиболее доступным и одновременно активным катализатором оказалось пористое железо. Однако железные катализаторы характеризуются высокой температурой активации (~400 °С). При температурах выше 550 °С происходит спекание катализатора, что снижает его активность. Для обеспечения реакции требуются высокие давления (30–35 МПа), что увеличивает энергозатраты и усложняет конструкцию оборудования.

Методы исследования

Современные железные катализаторы в вюститной модификации с гранулами 6–10 мм и насыпной плотностью $3,40 \pm 0,15$ кг/л, модифицированные структурообразующими и активирующими промоторами, позволяют достигать выход аммиака на уровне стандартных промышленных катализаторов [8].

Целью работы является исследование влияния химического состава железооксидных катализаторов вюститной модификации на их активность и удельную поверхность в интервале температур 400–500 °С.

Подготовка, восстановление и испытания катализаторов проводились в соответствии со стандартными методиками анализа и оценки каталитических материалов [4,5].

Восстановление катализаторов проводили на лабораторной установке высокого давления при $P = 50$ атм с постепенным повышением температуры до 500 °С, объемной скоростью потока $Q = 30\,000$ ч⁻¹, используя азотно-водородную смесь стехиометрического состава.

Определение активности проводили при давлениях 100 и 300 атм, температуре 400–500 °С и объемной скорости $Q = 15\,000$ – $30\,000$ ч⁻¹.

Удельную поверхность определяли методом низкотемпературной адсорбции азота на вакуумно-статической установке после проведения каталитических испытаний и пассивации катализаторов охлажденным воздухом.

Константа скорости реакции рассчитывалась по уравнению:

$$r = k \cdot [N_2]^a \cdot [H_2]^b$$

где: r — скорость реакции (моль/(л·с) или моль/(г катализатора·ч)); k — константа скорости реакции; $[N_2]$ и $[H_2]$ — концентрации азота и водорода; a , b — порядки реакции по каждому реагенту.

Константа скорости определялась согласно уравнению Аррениуса:

$$k = A \cdot e^{-\frac{E_a}{RT}}$$

где: k — константа скорости реакции, A — пред экспоненциальный фактор (частота столкновений), E_a — энергия активации, Дж/моль, R — универсальная газовая постоянная (8,314 Дж/(моль К)), T — абсолютная температура, К.

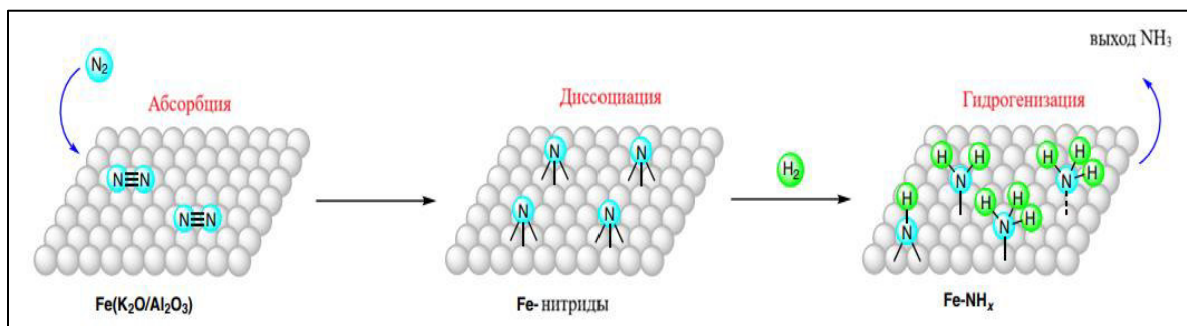


Рисунок 1 – Механизм протекания реакции Габера-Боша на поверхности железооксидных катализаторов
Figure 1 – Mechanism of the Haber–Bosch reaction proceeding on the surface of iron oxide catalysts

Механизм реакции на поверхности железного катализатора включает несколько последовательных стадий [9]. Лимитирующим этапом является активация и диссоциация молекул азота ($N \equiv N$, энергия диссоциации ~940 кДж/моль). Промоторы состава катализатора изменяют

электронную структуру её поверхности, повышая каталитическую активность. Водород адсорбируется и диссоциирует быстро, после чего атомы азота последовательно гидрируются до NH , NH_2 и NH_3 , которая десорбируется с поверхности (рис. 1).

Образец железного катализатора, используемого в исследованиях, приведен на рис.2.



Рисунок 2 — Железный катализатор, используемый в реакции Габера–Боша
Figure 2 – Iron catalyst used in the Haber–Bosch reaction

Результаты и обсуждение

Несмотря на широкое промышленное применение железосодержащих катализаторов в реакциях Габера–Боша, в настоящее время активно ведутся исследования, направленные на поиск альтернативных каталитических систем, способных обеспечивать протекание процесса при более мягких температурных и энергетических условиях.

Это прежде всего связано с необходимостью повышения энергоэффективности и снижения затрат при реализации соответствующих технологических процессов. Железо в составе традиционных катализаторов выступает в роли активного центра и основы катализатора, где используют различные его формы и модификации. На поверхности таких катализаторов происходит адсорбция и последующая диссоциация молекул азота (N_2) и водорода (H_2). При этом именно стадия разрыва прочной тройной связи в молекуле азота считается лимитирующей стадией всего процесса, определяющей его общую скорость.

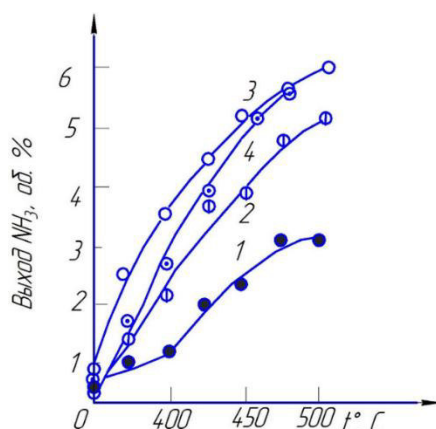


Рисунок 3 - Зависимость содержания NH_3 на выходе из реактора от температуры для железных катализаторов с различным содержанием K_2O ($P = 100$ атм, $Q = 30\,000$ ч⁻¹). Содержание K_2O , мас. %: 1 – 0; 2 – 3; 3 – 5; 4 – 6
Figure 3 – Dependence of NH_3 content at the reactor outlet on temperature for iron catalysts with different K_2O contents ($P = 100$ atm, $Q = 30,000$ h⁻¹). K_2O content, wt. %: 1 – 0; 2 – 3; 3 – 5; 4 – 6.

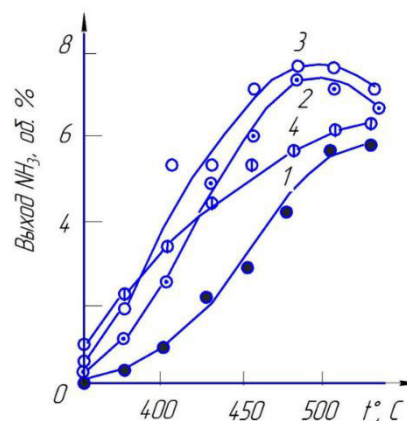


Рисунок 4- Зависимость содержания NH_3 на выходе из реактора от температуры для железных катализаторов с различным содержанием Al_2O_3 ($P = 100$ атм, $Q = 3000$ ч⁻¹). Содержание Al_2O_3 , мас. %: 1 – 5; 2 – 10; 3 – 15; 4 – 25.
Figure 4 – Dependence of NH_3 content at the reactor outlet on temperature for iron catalysts with different Al_2O_3 contents ($P = 100$ atm, $Q = 3000$ h⁻¹). Al_2O_3 content, wt. %: 1 – 5; 2 – 10; 3 – 15; 4 – 25

Для повышения эффективности катализаторов изучалось влияние различных промоторов (оксидов алюминия (Al_2O_3) и оксидов калия (K_2O)) на эффективность катализаторов. Влияние промоторов K_2O и Al_2O_3 для железных катализаторов с различным содержанием при $P = 100$ атм, $Q = 30\,000\text{ ч}^{-1}$ отражено на рис. 3 и 4.

Результаты исследований показали, что оптимальным содержанием промоторов в виде оксида калия (K_2O) и оксида алюминия (Al_2O_3) составляют содержание K_2O — 5 мас. %, Al_2O_3 — 15 мас.%. Оксид алюминия (Al_2O_3) увеличивает площадь поверхности катализатора, а оксид калия (K_2O) способствует десорбции аммиака и снижает энергию активации.

Для изучения влияния модифицирующего действия оксида кобальта в структуре катализатора, увеличения активности и устойчивости к отравлению был проведен ряд исследований по определению синергического эффекта с железом. Результаты влияния оксида кобальта (CoO) на температурную зависимость выхода NH_3 из реактора для катализатора с составом: 15 мас. % Al_2O_3 и 5 мас. % K_2O , а также варьирование содержания CoO 0~10 мас.% показаны на рис. 5–6

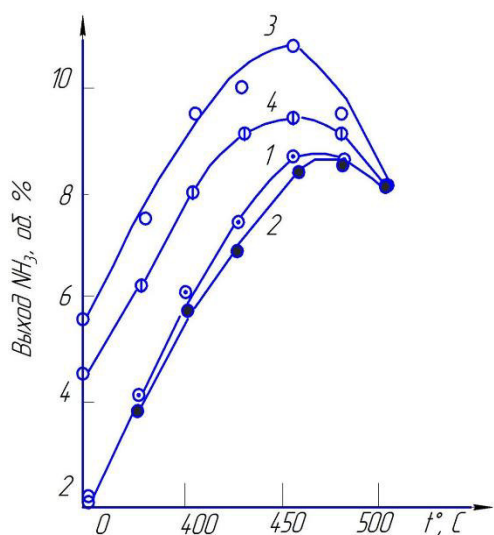


Рисунок 5 - Зависимость содержания NH_3 на выходе из реактора от температуры при $P = 100$ атм и $Q = 15000\text{ ч}^{-1}$ для железных катализаторов с различным содержанием кобальта (в пересчёте на CoO , мас.%): 1 – 0; 2 – 3; 3 – 5; 4 – 10

Figure 5 – Dependence of NH_3 content at the reactor outlet on temperature at $P = 100$ atm and $Q = 15,000\text{ h}^{-1}$ for iron catalysts with different cobalt contents (recalculated as CoO , wt.%): 1 – 0; 2 – 3; 3 – 5; 4 – 10

10

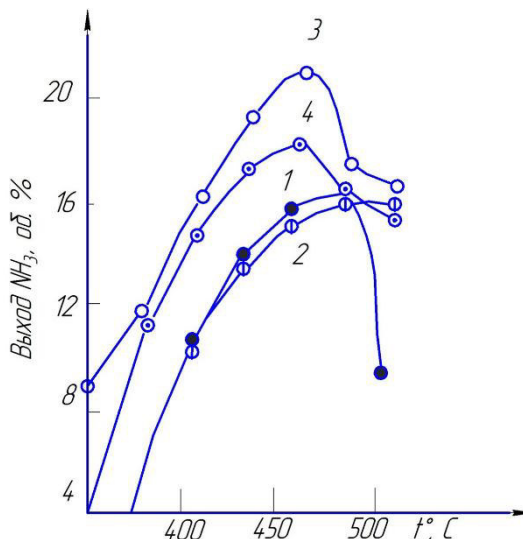


Рисунок 6 – Зависимость содержания NH_3 на выходе из реактора от температуры при $P = 300$ атм и $Q = 30000\text{ ч}^{-1}$ для железных катализаторов с различным содержанием кобальта (в пересчёте на CoO , мас.%): 1 – 0; 2 – 3; 3 – 5; 4 – 10

Figure 6 – Dependence of NH_3 content at the reactor outlet on temperature at $P = 300$ atm and $Q = 30,000\text{ h}^{-1}$ for iron catalysts with different cobalt contents (recalculated as CoO , wt.%): 1 – 0; 2 – 3; 3 – 5; 4 – 10.

Установлено, что оптимальная концентрация CoO составляет около 5 мас. % и зависит от температуры при условиях $P=300$ атм и $Q= 30000\text{ ч}^{-1}$, обеспечивая максимальный выход аммиака (NH_3).

Для железных катализаторов вюститной модификации содержание 5 мас % оксида кобальта (CoO), концентрация аммиака на выходе из реактора при $P=100$ атм, $t= 450\text{ °C}$ и $Q= 15000\text{ ч}^{-1}$ составляют 10.6 об.%.

При повышении давления до $P = 300$ атм и объемной скорости подачи газа до $Q = 30000\text{ ч}^{-1}$ содержание аммиака возрастает до 21,5 об.%. Полученные значения соответствуют уровню,

характерному для стандартных промышленных катализаторов синтеза аммиака. Установлено, что оптимальная температура процесса составляет около $t = 450^\circ\text{C}$.

В таблице 1 представлены значения удельной поверхности ($S_{\text{уд}}$), константы скорости реакции (k) и удельной константы скорости ($k_{\text{уд}}$). Как следует из данных таблицы, с увеличением содержания Al_2O_3 удельная поверхность катализаторов возрастает от 8 до 29 $\text{м}^2/\text{г}$, что обусловлено его функцией структурообразующего промотора. Введение оксида алюминия способствует стабилизации дисперсного состояния железной фазы и препятствует агломерации частиц при термической обработке. Формирование развитой пористой структуры приводит к увеличению удельной поверхности и, как следствие, к росту числа активных центров, доступных для протекания реакции синтеза аммиака. В то же время константа скорости реакции и удельная константа скорости достигают максимального значения при содержании 15% Al_2O_3 в катализаторе.

В то же время выбор оксида кобальта в исследованиях в качестве модифицирующей добавки обусловлен его способностью изменять электронную структуру поверхности катализатора. Оксид кобальта (CoO) частично восстанавливается в условиях процесса и способствует формированию активных Fe-Co центров. Эти образовавшиеся центры облегчают активацию молекулы азота (N_2) и приводят к повышению скорости реакции.

Таблица 1 – Влияние содержания Al_2O_3 в составе катализаторов на их удельную поверхность и каталитическую активность ($P = 100 \text{ атм}$, $t = 450^\circ\text{C}$, $Q = 30\,000 \text{ ч}^{-1}$)

Table 1 – Effect of Al_2O_3 content in the catalyst composition on their specific surface area and catalytic activity ($P = 100 \text{ атм}$, $t = 450^\circ\text{C}$, $Q = 30,000 \text{ h}^{-1}$).

Содержание Al_2O_3 , мас. %	$S_{\text{уд}}$, $\text{м}^2/\text{г}$	k , $\text{ат}^{0.5\cdot\text{ч}^{-1}}$	$k_{\text{уд}}$, $\text{ат}^{0.5\cdot\text{ч}^{-1}\cdot\text{м}^{-2}}$
5	7,8	9586	661
10	14,7	32495	1196
15	15,5	33962	1216
20	28,7	17326	658

В таблице 2 приведены результаты влияния добавки оксида кобальта (CoO) на удельную поверхность и каталитическую активность железных катализаторов вюстенитной модификации синтеза аммиака по реакции Габера-Боша.

Таблица 2 – Влияние добавки CoO на удельную поверхность и каталитическую активность железных катализаторов вюстенитной модификации синтеза аммиака

Table 2 – Effect of CoO additive on the specific surface area and catalytic activity of wüstite-modified iron catalysts for ammonia synthesis

Содержание оксида кобальта (CoO), мас. %	$S_{\text{уд}}$, $\text{м}^2/\text{г}$	k (450°C), $\text{ат}^{0.5\cdot\text{ч}^{-1}}$		$k_{\text{уд}}$ (450°C), $\text{ат}^{0.5\cdot\text{ч}^{-1}\cdot\text{м}^{-2}}$	
		$P = 100 \text{ атм}$	$P = 300 \text{ атм}$	$P = 100 \text{ атм}$	$P = 300 \text{ атм}$
0	23,8	12379	11637	327	307
3	26,2	12379	10643	337	289
5	28,3	21102	23684	434	487
10	23,8	15460	16225	378	396

Анализ данных, представленных в таблице 2, показывает, что изменение содержания кобальта практически не влияет на величину удельной поверхности катализаторов, однако оказывает существенное влияние на константу скорости реакции и удельную каталитическую активность, для которых наблюдаются максимальные значения.

Так, для образцов с содержанием 5 мас. % кобальта (Co) значения константы скорости реакции составляют: при давлении 100 атм $k=21102 \text{ ат}^{0.5\cdot\text{ч}^{-1}}$ и при давлении 300 атм $k=23684 \text{ ат}^{0.5\cdot\text{ч}^{-1}}$. Удельная каталитическая активность при этом достигает: при давлении 100 атм $k_{\text{уд}} = 434 \text{ ат}^{0.5\cdot\text{ч}^{-1}\cdot\text{м}^{-2}}$ и при давлении 300 атм $k_{\text{уд}} = 487 \text{ ат}^{0.5\cdot\text{ч}^{-1}\cdot\text{м}^{-2}}$. Приведённые результаты улучшают кинетические

параметры железных катализаторов и свидетельствуют о том, что введение промотора в виде оксида кобальта (CoO) в состав железооксидных катализаторов обусловлено его способностью оказывать модифицирующее влияние на активные центры. Присутствие кобальта способствует образованию более устойчивых и активных каталитических центров, обеспечивая рост каталитической активности без существенного изменения удельной поверхности.

В таблице 3 представлен состав железооксидного катализатора вюститной модификации, включающий структурообразующие, активирующие и модифицирующие промоторы, оказывающие существенное влияние на его структурные и каталитические характеристики в процессе синтеза аммиака. Основу катализатора составляет железооксидная фаза в вюститной модификации, определяющая формирование активных центров, тогда как введение промоторов направлено на регулирование его текстурных и кинетических свойств.

Таблица 3 – Состав и функциональная роль компонентов катализатора, мас. %

Table 3 – Composition and functional role of catalyst components, wt. %

Компонент	Содержание мас. %	Функция
FeO+Fe (1-x) O _x	75	Основа катализатора
Al ₂ O ₃ (оксид алюминия)	15	Структурообразующий промотор, предотвращает спекание
K ₂ O (оксид калия)	5	Активирующий промотор, облегчает десорбцию аммиака
CoO (оксид кобальта)	5	Модифицирующий промотор, повышает каталитическую активность

Анализ представленного состава показывает, что структурообразующий промотор Al₂O₃ способствует увеличению удельной поверхности за счет формирования развитой пористой структуры и предотвращения спекания частиц. Активирующий промотор K₂O влияет на процессы адсорбции и десорбции, облегчая удаление образующего аммиака с поверхности катализатора. В свою очередь, модифицирующая добавка CoO изменяет электронную структуру активных центров, способствуя их повышенной реакционной способности. Таким образом, совокупное действие указанных компонентов обеспечивает формирование эффективной каталитической системы, характеризующейся повышенной активностью и стабильностью в условиях синтеза аммиака (NH₃) по принципу Габера-Боша.

Выводы

1. Результаты исследований показали, что оптимальное содержание промоторов в виде оксидов калия и алюминия в железных катализаторах в вюститной модификации составляют: 5 мас. % K₂O и 15 мас. % Al₂O₃. Установлено, что данные добавки способствуют повышению каталитической активности и стабильности катализаторов, что делает их перспективными для промышленного применения;

2. Установлено, что введение добавок в виде оксида кобальта (CoO) в состав железных катализаторов в диапазоне 0-10 мас. % не приводит к увеличению удельной поверхности, тогда как повышение содержания Al₂O₃ способствует её росту от 8 до 29 м²/г;

3. Полученные результаты подтверждают перспективность использования промоторов в виде оксида калия (K₂O), оксида алюминия (Al₂O₃) и оксида кобальта (CoO) в составе железных катализаторов вюститной модификации для низкотемпературного (450°C) синтеза аммиака по реакции Габера-Боша.

Рецензент – Д.Р. Рузиев — д.т.н., профессор кафедры «Прикладной химии» Таджикского национального университета.

Литература

1. Ермаков, А.А. Современные технологии синтеза аммиака и их развитие / А.А. Ермаков, В.Н. Кузнецов // *Химическая промышленность сегодня*. - 2022. - №5. - С. 12–18.
2. Кузьмин, Д.А. Перспективы развития технологий синтеза аммиака / Д.А. Кузьмин, С.В. Орлов // *Теоретические основы химической технологии*. - 2024. - Т. 58, - №2. - С. 215–222.
3. Аникин, В.А. Аммиак как перспективный энергоноситель в водородной энергетике / В.А. Аникин, Д.С. Кузнецов // *Энергетика: экономика, технологии, экология*. - 2023. - №4. - С. 42–48.

4. Левин, Б.В. Перспективы использования аммиака в качестве носителя водорода / Б.В. Левин, А.А. Смирнов // *Теплоэнергетика*. - 2022. - №9. - С. 25–31.
5. Баранов, С.В. Аммиак как альтернативное топливо и средство хранения водорода / С.В. Баранов, Н.П. Орлов // *Химическая промышленность сегодня*. - 2021. - №6. - С. 15–20.
6. Ермаков, А.А. Использование аммиака в энергетике будущего / А.А. Ермаков, П.Н. Федоров // *Альтернативная энергетика и экология*. - 2024. - №2. - С. 55–63.
7. Гайбуллаева, З.Х. Получение восстановительных веществ способом переработки углей Фон-Ягноб / З.Х. Гайбуллаева, Ш.Б. Бахриддинзода, Б.И. Асроров, А. Шарифов // *Политехнический вестник. Серия инженерные исследования*. – 2021. - №4 (56). – С. 92-97.
8. Гайбуллаева, З.Х. Повышение активности и устойчивости железных катализаторов в промышленном синтезе аммиака / З.Х. Гайбуллаева, Т.Х. Гадоев // *Ломоносовские XVI чтения: сборник трудов международной научно-практической конференции*. – Душанбе. - 2026. – С. 25-30.
9. Бойл, М. Модельный комплекс железа для процесса Габера-Боша. - Ж.: Химия. - №1. - 2021. <https://nplus1.ru/news/2021/12/30/nitrido-complexes> (дата обращения 15.03.2026).

References

1. Ermakov, A.A., Kuznetsov, V.N. Modern Technologies of Ammonia Synthesis and Their Development // *Chemical Industry Today*. – 2022. – No. 5. – P. 12–18.
2. Kuzmin, D.A., Orlov, S.V. Prospects for the Development of Ammonia Synthesis Technologies // *Theoretical Foundations of Chemical Engineering*. – 2024. – Vol. 58. – No. 2. – P. 215–222.
3. Anikin, V.A., Kuznetsov, D.S. Ammonia as a Promising Energy Carrier in Hydrogen Energy // *Energy: Economics, Technologies, Ecology*. – 2023. – No. 4. – P. 42–48.
4. Levin, B.V., Smirnov, A.A. Prospects for the Use of Ammonia as a Hydrogen Carrier // *Thermal Engineering*. – 2022. – No. 9. – P. 25–31.
5. Baranov, S.V., Orlov, N.P. Ammonia as an Alternative Fuel and Hydrogen Storage Medium // *Chemical Industry Today*. – 2021. – No. 6. – P. 15–20.
6. Ermakov, A.A., Fedorov, P.N. The Use of Ammonia in the Energy Sector of the Future // *Alternative Energy and Ecology*. – 2024. – No. 2. – P. 55–63.
7. Gaibullaeva, Z.Kh., Bakhriddinzoda, Sh.B., Asrorov, B.I., Sharifov, A. Production of Reducing Agents by Processing Fon-Yagnob Coals // *Polytechnic Bulletin. Series: Engineering Studies*. – 2021. – No. 4(56). – P. 92–97.
8. Gaibullaeva, Z.Kh., Gadoev, T.Kh. Improving the Activity and Stability of Iron Catalysts in Industrial Ammonia Synthesis // *Lomonosov XVI Readings: Proceedings of the International Scientific and Practical Conference*. – Dushanbe, 2026. – P. 25–30.
9. Boyle, M. Model Iron Complex for the Haber–Bosch Process // *Chemistry*. – 2021. – No. 1. Available at: <https://nplus1.ru/news/2021/12/30/nitrido-complexes> (accessed: 15.03.2026).

МАЪЛУМОТ ОИД БА МУАЛЛИФОН - СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ –INFORMATION ABOUT AUTHORS

TJ	RU	EN
Гайбуллоева Зумрат Ҳабибовна	Гайбуллаева Зумрат Хабибовна	Gaibullaeva Zumrat Habibovna
д.и.т., дотсент кафедраи “Технологияи истехсолоти химиявӣ”	д.т.н., доцент кафедры «Технология химического производства»	doctor of technical science, senior teacher of the department “Technology of Chemistry industry”
Донишгоҳи техникии Тоҷикистон ба номи акад. М.С. Осимӣ	Таджикский технический университет им. акад. М.С. Осими	Tajik technical University named after acad. M.S. Osimy
E-mail: zumratihabib@rambler.ru		
TJ	RU	EN
Гадоев Тоҷиддин Ҳусниддинович	Гадоев Тоджиддин Хусниддинович	Gadoev Tojiddin Khusniddinovich
Директори техникӣ	Технический директор	Technical director
ҚСҚ “Азот”	ОАО “Азот”	OAO “Azot”
E-mail: gadoev80@mail.ru		

КРИСТАЛЛОХИМИЯ И МАГНИТНЫЕ СВОЙСТВА ТВЕРДЫХ РАСТВОРОВ АНТИМОНИДОВ СОСТАВА $Gd_4Sb_3 - Ln_4Sb_3$ ($Ln = Tb, Dy$)

¹В.Д. Абулхаев, ²Х.Х. Назарзода, ³Х.А. Рахимов

¹Институт химии им. В.И. Никитина НАН Таджикистана, г. Душанбе, Республика Таджикистан

²Таджикский государственный университет коммерции, г. Душанбе, Республика Таджикистан

³Институт энергетики Таджикистана, р-н Кушониён, Республика Таджикистан

В работе представлены результаты синтеза и исследования кристаллохимии и магнитных свойств твёрдых растворов антимонидов состава $Gd_4Sb_3 - Ln_4Sb_3$ ($Ln = Tb, Dy$). Актуальность исследования обусловлена востребованностью материалов на основе редкоземельных элементов (РЗЭ) в высокотехнологичных областях - в частности, благодаря их выраженным магнитным, оптическим и электрофизическим характеристикам; такие соединения перспективны для применения в постоянных магнитах, логических элементах, системах памяти и магнитных холодильных установках. Синтез антимонидов Gd_4Sb_3 , Tb_4Sb_3 , Dy_4Sb_3 и твёрдых растворов на их основе выполнен на высокотемпературном комплексе ВДТА-8МЗ в условиях разряжения до $1,33 \times 10^{-2}$ Па при температуре до 1273 К (± 10 К) с использованием молибденовых тиглей. Оптимальным признан метод синтеза с применением предварительно полученных антимонидов в качестве прекурсоров: он позволяет надёжно фиксировать сурьму в химических связях, исключить её улетучивание и обеспечить соответствие стехиометрическому составу, а также сократить время синтеза. Фазовый состав и монофазность образцов подтверждены рентгенофазовым и микроструктурным анализами (дифрактометр «Дрон-2», микроскоп «Неофот-21»). Установлено, что все соединения имеют структурную аналогию и кристаллизуются в кубической сингонии (пространственная группа $I43d$, структурный тип анти- Th_3P_4). В ходе работы определены параметры элементарных ячеек, плотность и микротвёрдость исходных антимонидов и твёрдых растворов - показано плавное изменение параметров кристаллической решётки при варьировании состава. Магнитные свойства исследованы методом измерения магнитной восприимчивости на установке с маятниковыми весами в диапазоне температур 298–773 К.

Ключевые слова: сплавы и соединение РЗЭ, синтез, кристаллохимия, магнитные свойства, парамагнитная температура Кюри, антимониды и компоненты.

КРИСТАЛЛОХИМИЯ ВА ХОСИЯТҲОИ МАГНИТНИИ МАҲЛУЛҲОИ САХТИ СИСТЕМАИ $Gd_4Sb_3 - Ln_4Sb_3$ ($Ln = Tb, Dy$)

¹В.Д. Абулхаев, ²Х.Х. Назарзода, ³Х.А. Рахимов

¹Институти химияи ба номи В.И. Никитини АМИТ, шаҳри Душанбе, Чумҳурии Тоҷикистон

²Донишгоҳи давлатии тичорати Тоҷикистон, шаҳри Душанбе, Чумҳурии Тоҷикистон

³Институти энергетикӣ Тоҷикистон, ноҳияи Кушониён, Чумҳурии Тоҷикистон

Дар мақола натиҷаҳои синтез ва таҳқиқи кристаллохимия ва хосиятҳои магнитии маҳлулҳои саҳти антимонидҳои таркиби $Gd_4Sb_3 - Ln_4Sb_3$ ($Ln = Tb, Dy$) пешниҳод шудаанд. Муҳимияти таҳқиқот бо талаботи маводи дар асоси элементҳои нодирӣ (ЭНЗ) асосёфта дар соҳаҳои балантехнологӣ вобаста мебошад, зеро онҳо дорои хусусиятҳои барҷастаи магнитӣ, оптикӣ ва электрофизикӣ мебошанд; чунин пайвастиҳо барои истифода дар магнитҳои доимӣ, унсурҳои мантиқӣ, системаҳои хотира ва дастгоҳҳои яхкунии магнитӣ умедбахш мебошанд. Синтези антимонидҳои Gd_4Sb_3 , Tb_4Sb_3 , Dy_4Sb_3 ва маҳлулҳои саҳти дар асоси онҳо бо истифода аз маҷмааи ҳароратбаланди ВДТА-8МЗ дар шароити вакууми то $1,33 \times 10^{-2}$ Па ва ҳарорати то 1273 К (± 10 К) бо истифодаи тигелҳои молибдёнӣ анҷом дода шуд. Усули оптималии синтез усули эътироф гардид, ки дар он антимонидҳои қаблан ҳосилшуда ҳамчун прекурсор истифода мешаванд; ин усул имкон медиҳад, ки сурма дар пайвастиҳои химиявӣ боэтимод нигоҳ дошта шуда, бухоршавии он пешгирӣ гардад, мувофиқати таркиби стехиометрӣ таъмин шавад ва вақти синтез кам карда шавад. Таркиби фазавӣ ва якфазагӣ будани намунаҳо бо усулҳои таҳлили рентгенофазавӣ ва микроструктурӣ (дифрактометри «Дрон-2», микроскопии «Неофот-21») тасдиқ карда шуданд. Муайян гардид, ки ҳамаи пайвастиҳои монандии сохторӣ дошта, дар зарфи кубӣ кристалл мешаванд (гурӯҳи фазавӣ $I43d$, навъи сохтории анти- Th_3P_4). Дар қарабни қор параметрҳои хуҷайраҳои элементарӣ, зичӣ ва саҳтии микроскопии антимонидҳои ибтидоӣ ва маҳлулҳои саҳт муайян карда шуданд; тағйирёбии ҳамвори параметрҳои панҷараи кристаллӣ ҳангоми тағйир додани таркиб нишон дода шуд. Хосиятҳои магнитӣ бо усули ченкунии ҳассосияти магнитӣ дар дастгоҳи дорои тарозуҳои маятникӣ дар диапозони ҳароратии 298–773 К таҳқиқ карда шуданд.

Калидвожаҳо: ҳулаҳо ва пайвастиҳои (ЭНЗ), синтез, кристаллохимия, хосиятҳои магнитӣ, ҳарорати парамагнитии Кюри, антимонидҳо и компонентҳо.

CRYSTAL CHEMISTRY AND MAGNETIC PROPERTIES OF SOLID SOLUTIONS OF ANTIMONIDES OF THE COMPOSITION $Gd_4Sb_3 - Ln_4Sb_3$ ($Ln = Tb, Dy$)

¹V.J. Abulhaev, ²Kh.Kh. Nazarzoda, ³Kh.A. Rakhimov

¹V.I. Nikitin Institute of Chemistry, National Academy of Sciences of Tajikistan, Dushanbe, Tajikistan

²Tajik State University of Commerce, Dushanbe, Tajikistan

³Institute of Energy of Tajikistan, Bokhtar, Tajikistan

The paper presents the results of the synthesis and study of the crystal chemistry and magnetic properties of solid solutions of antimonides of the composition $Gd_4Sb_3 - Ln_4Sb_3$ ($Ln = Tb, Dy$). The relevance of the study is due to the demand for materials based on rare earth elements (REE) in high-tech areas, in particular, due to their pronounced magnetic, optical and electrophysical properties; such compounds are promising for use in permanent magnets, logic elements, memory systems and magnetic refrigeration units. The synthesis of antimonides Gd_4Sb_3 , Tb_4Sb_3 , Dy_4Sb_3 and solid solutions based on them was performed on a high-temperature complex VDTA-8M3 under vacuum conditions of up to 1.33×10^{-2} Pa at temperatures of up to

1273 K (± 10 K) using molybdenum crucibles. A synthesis method using pre-prepared antimonides as precursors was found to be optimal: it reliably immobilizes antimony in chemical bonds, prevents its volatilization, and ensures compliance with the stoichiometric composition, as well as reducing synthesis time. The phase composition and single-phase nature of the samples were confirmed by X-ray diffraction and microstructural analysis (Dron-2 diffractometer, Neofot-21 microscope). It was established that all compounds have structural similarities and crystallize in a cubic syngony (space group $\bar{1}43d$, structural type anti-Th₃P₄). During the study, the unit cell parameters, density, and microhardness of the starting antimonides and solid solutions were determined; a smooth change in the crystal lattice parameters with varying composition was demonstrated. The magnetic properties were studied by measuring magnetic susceptibility using a pendulum balance in the temperature range of 298–773 K. All the studied phases exhibit paramagnetic behavior, and the temperature dependences of the inverse molar magnetic susceptibility are consistent with the Curie–Weiss law. Data on the molar magnetic susceptibility (at 298 K), paramagnetic Curie temperature, and effective magnetic moments of rare-earth ions are systematized.

Keywords: rare earth alloys and compounds, synthesis, crystal chemistry, magnetic properties, paramagnetic Curie temperature, antimonides and components.

Введение

Востребованность сплавов и соединений на основе РЗЭ в данных сферах объясняется их уникальными физико-химическими характеристиками: магнитными, оптическими и электрофизическими. К примеру, магнитные параметры ортоферритов и ферритов-гранатов позволяют задействовать их в производстве постоянных магнитов, а также при разработке логических элементов и систем памяти. В то же время гадолиний и его интерметаллиды с железом, кремнием или германием служат рабочим телом в магнитных холодильных установках благодаря выраженному магнетокалорическому эффекту и оптимальной температуре Кюри [1, 2, 5].

В связи с этим изучение кристаллихимии (типы кристаллических решеток, параметры элементарной ячейки) и магнитных свойств твердых растворов на основе антимонидов редкоземельных элементов разного состава является актуальной работой.

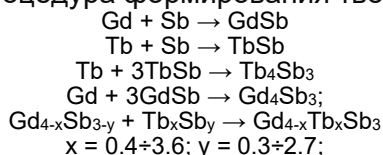
Целью данной работы являются синтез, исследование кристаллохимии и магнитных свойств твердых растворов антимонидов состава Gd_4Sb_3 - Ln_4Sb_3 ($Ln = Tb, Dy$).

Синтез антимонидов и твердых растворов

Экспериментальная часть по получению сложных антимонидов Gd_4Sb_3 , Tb_4Sb_3 , Dy_4Sb_3 и соответствующих твердых растворов на базе Gd_4Sb_3 - Ln_4Sb_3 ($Ln = Tb, Dy$) была реализована с применением высокотемпературного комплекса ВДТА-8М3. Термическую обработку проводили в условиях разряжения до $1,33 \times 10^{-2}$ Па. Мониторинг температурных показателей осуществлялся посредством термопары типа ВР 5/20 при достижении 1273 К отклонение не превышало (± 10 K). Использование молибденовых тиглей с герметичным затвором дало возможность минимизировать контакт реакционной смеси с внешней средой. Применение молибдена в качестве контейнерного материала подтверждено исследованиями [2–4], указывающими на его высокую коррозионную стойкость в контакте с расплавленными редкоземельными металлами.

Образование твердых растворов

Формирование твердых растворов в исследуемых системах может осуществляться путем прямого сплавления сурьмы с Gd, Tb или Dy. Альтернативный метод предполагает использование в качестве первичной шихты предварительно подготовленные антимониды типа Ln_4Sb_3 ($Ln = Gd, Tb, Dy$). Ниже детально описана процедура формирования твердых растворов Gd_4Sb_3 - Tb_4Sb_3 .



При получении твердых растворов наиболее целесообразным был признан второй метод синтеза, который имеет следующие преимущества:

- предварительно синтезированные антимониды надёжно обеспечивают получение твердых растворов;
- применение антимонидов в качестве прекурсоров позволяет надёжно зафиксировать сурьму в химических связях, что исключает её улетучивание из реакционного пространства. Такой подход обуславливает строгое соответствие полученных соединений по заданному стехиометрическому составу;
- применение заранее полученных антимонидов, как исходное сырьё, позволяет нагревать реакционную смесь с большой скоростью и одновременно сократить время синтеза продуктов [2, 4, 6].

В ниже представленной таблице приведены характеристики антимонидов Ln_4Sb_3 ($\text{Ln} = \text{Gd}, \text{Tb}, \text{Dy}$). Монофазные свойства приведенных веществ и изменённых продуктов, (модификации твердых растворов), были экспериментально доказаны методом МСА и методом рентгенофазового анализа.

Таблица 1 - Параметры кристаллической структуры и химические свойства антимонидов Ln_4Sb_3 ($\text{Ln} = \text{Gd}, \text{Tb}, \text{Dy}$)
Table 1 – Parameters of the crystal structure and chemical properties of Ln_4Sb_3 antimonides ($\text{Ln} = \text{Gd}, \text{Tb}, \text{Dy}$)

Антимониды	Структурный тип	Параметр элементарной ячейки, ±0.0005 нм			Плотность, кг/м³		Микротвердость, МПа
		a	b	c	эксперим	расчет.	
Антимониды РЗЭ							
Gd ₄ Sb ₃	-//-	0.9240			8420	8428	4860±130
Tb ₄ Sb ₃	-//-	0.9165			8665	8672	4950±150
Dy ₄ Sb ₃	-//-	0.9120			8921	8927	5100±80

Подтверждено, что соединения с сурьмой имеют полную структурную аналогию и при этом их кристаллическая архитектура соответствует пространственной группе $\bar{4}3d$ [7, 8] (кубическая сингония, структурный тип анти - Th_3P_4) [7, 8]. В нижеприведенной таблице изложены кристаллохимические параметры твердых растворов для изучаемых систем.

Таблица 2 - Кристаллохимические показатели твердых растворов $\text{Gd}_{4-x}\text{Ln}_x\text{Sb}_3$ ($\text{Ln} = \text{Tb}, \text{Dy}; x = 0.4 \div 3.6$)
Table 2 – Crystal-chemical parameters of $\text{Gd}_{4-x}\text{Ln}_x\text{Sb}_3$ solid solutions ($\text{Ln} = \text{Tb}, \text{Dy}; x = 0.4 - 3.6$)

Твердые растворы	Параметр элементарной ячейки, ± 0.0005 нм	Плотность, кг/м^3	
	a	экспер.	расчет.
Система $\text{Gd}_4\text{Sb}_3 - \text{Tb}_4\text{Sb}_3$			
$\text{Gd}_{3.6}\text{Tb}_{0.4}\text{Sb}_3$	0.9225	8418	8423
$\text{Gd}_{3.2}\text{Tb}_{0.8}\text{Sb}_3$	0.9220	8482	8486
$\text{Gd}_{2.8}\text{Tb}_{1.2}\text{Sb}_3$	0.9210	8510	8513
$\text{Gd}_{2.4}\text{Tb}_{1.6}\text{Sb}_3$	0.9206	8530	8536
$\text{Gd}_2\text{Tb}_2\text{Sb}_3$	0.9202	8548	8552
$\text{Gd}_{1.6}\text{Tb}_{2.4}\text{Sb}_3$	0.9195	8568	8577
$\text{Gd}_{1.2}\text{Tb}_{2.8}\text{Sb}_3$	0.9186	8602	8608
$\text{Gd}_{0.8}\text{Tb}_{3.2}\text{Sb}_3$	0.9182	8616	8619
$\text{Gd}_{0.4}\text{Tb}_{3.6}\text{Sb}_3$	0.9170	8662	8665
Система $\text{Gd}_4\text{Sb}_3 - \text{Dy}_4\text{Sb}_3$			
$\text{Gd}_{3.6}\text{Dy}_{0.4}\text{Sb}_3$	0.9230	8460	8464
$\text{Gd}_{3.2}\text{Dy}_{0.8}\text{Sb}_3$	0.9220	8506	8510
$\text{Gd}_{2.8}\text{Dy}_{1.2}\text{Sb}_3$	0.9210	8548	8555
$\text{Gd}_{2.4}\text{Dy}_{1.6}\text{Sb}_3$	0.9200	8562	8567
$\text{Gd}_2\text{Dy}_2\text{Sb}_3$	0.9190	8642	8648
$\text{Gd}_{1.6}\text{Dy}_{2.4}\text{Sb}_3$	0.9185	8676	8680
$\text{Gd}_{1.2}\text{Dy}_{2.8}\text{Sb}_3$	0.9175	8722	8726
$\text{Gd}_{0.8}\text{Dy}_{3.2}\text{Sb}_3$	0.9170	8754	8760
$\text{Gd}_{0.4}\text{Dy}_{3.6}\text{Sb}_3$	0.9165	8788	8791

Микроструктурный и рентгенофазовый анализы были проведены по стандартной методике. Рентгенографические исследования выполнялись на дифрактометре «Дрон-2» с применением CuK_α -излучения, прошедшего через никелевый фильтр. Анализ микроструктуры образцов выполнялся с помощью микроскопа «Неофот-21» в режимах поляризованного и отраженного света. В качестве травителей были использованы следующие реактивы: 1) 1% -ный раствор концентрированной HNO_3 в спирте; 2) раствор, содержащий 0,5 об. % HCl и 1 об. % HNO_3 в спирте [9, 10].

Магнитные свойства систем твердых растворов $Gd_4Sb_3 - Tb_4Sb_3$ и $Gd_4Sb_3 - Dy_4Sb_3$ исследовали методом измерения магнитной восприимчивости. Измерения выполнялись с использованием установки [11], функционирующей по принципу маятниковых весов.

Результаты исследования

Анализ магнитных характеристик показал парамагнитный характер как исходных фаз, так и сформированных на их основе твердых растворов во всем изученном тепловом диапазоне. Графики температурного хода величины $1/X_m$ для составов $Gd_{4-x}Ln_xSb_3$ ($Ln = Tb, Dy$; $x = 0.4 \div 3.6$) при нагреве от 298 до 773 К продемонстрированы на рис. 1, 2 (а, б). Характер полученных кривых указывает на то, что политермы обратной молярной магнитной восприимчивости беспрепятственно описываются классическим законом Кюри – Вейсса.

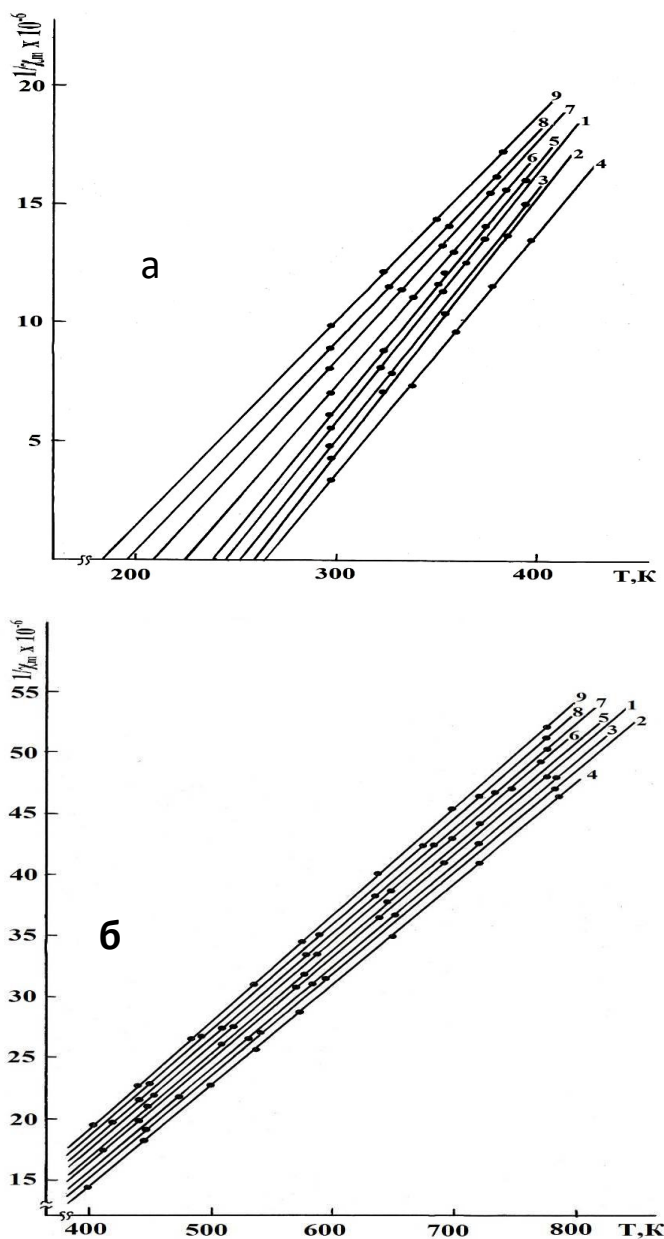


Рисунок 1 - Графики обратной магнитной восприимчивости твердых растворов $Gd_{4-x}Tb_xSb_3$, содержащих: 1- 10, 2- 20, 3-30, 4-40, 5-50, 6-60, 7-70, 8-80 и 9-90 мол.% Tb_4Sb_3 , в диапазоне температур 298 -400 К (а) и 400-773 К (б)
Figure 1 – Plots of inverse magnetic susceptibility of $Gd_{4-x}Tb_xSb_3$ solid solutions containing: 1 – 10, 2 – 20, 3 – 30, 4 – 40, 5 – 50, 6 – 60, 7 – 70, 8 – 80, and 9 – 90 mol.% Tb_4Sb_3 , in the temperature ranges of 298–400 K (a) and 400–773 K (b)

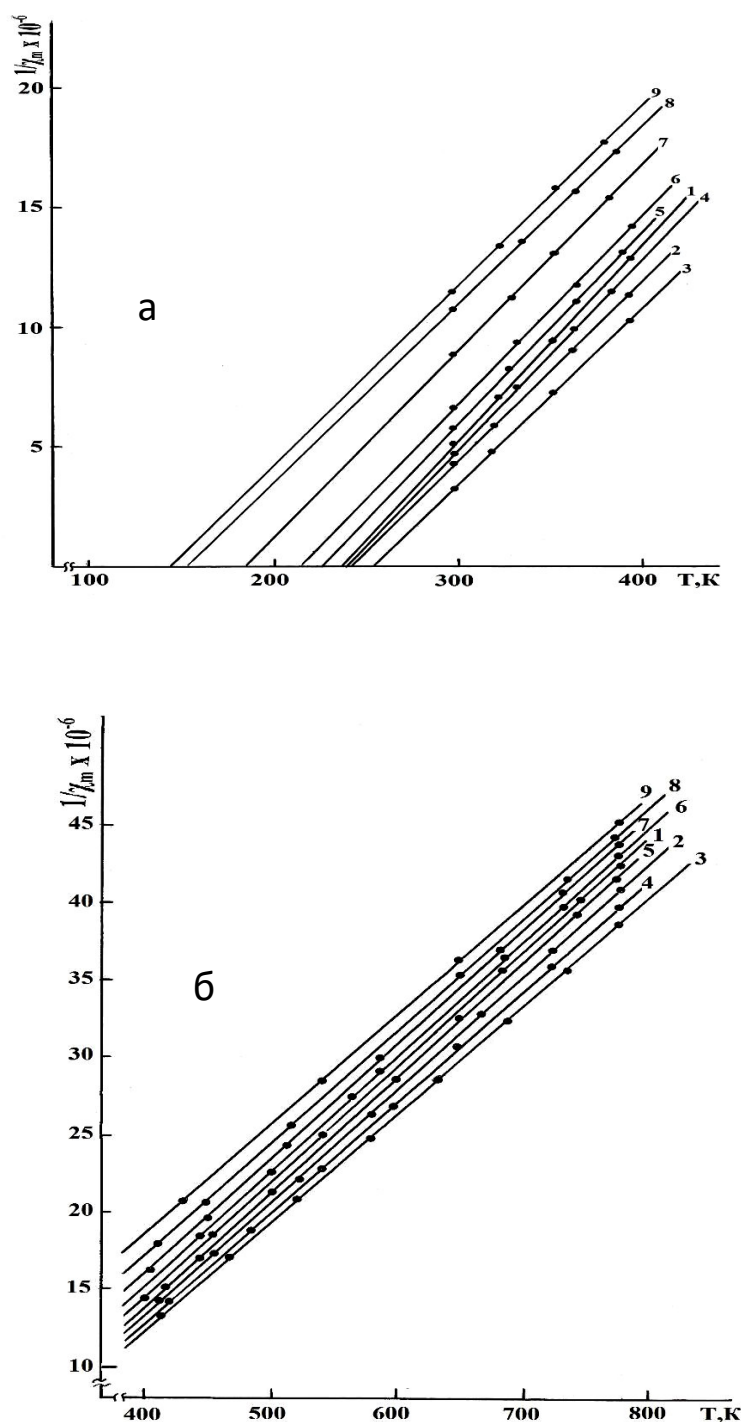


Рисунок 2 - Изменение обратной молярной магнитной восприимчивости твердых растворов $Gd_{4-x}Dy_xSb_3$, содержащих, а: 1- 10, 2-20, 3-30, 4-40, 5-50; б: 6-60, 7-70, 8-80 и 9-90 мол. % Dy_4Sb_3 в диапазоне температур 298-400 К (а) и 400-773 К (б)

Figure 2 – Variation of the inverse molar magnetic susceptibility of $Gd_{4-x}Dy_xSb_3$ solid solutions containing: (a) 1 – 10, 2 – 20, 3 – 30, 4 – 40, 5 – 50; (b) 6 – 60, 7 – 70, 8 – 80, and 9 – 90 mol.% Dy_4Sb_3 in the temperature ranges of 298–400 K (a) and 400–773 K (b)

Ниже в таблице представлены систематизированные экспериментальные данные по молярной магнитной восприимчивости (при $T = 298$ К), парамагнитной температуре Кюри и эффективным магнитным моментом редкоземельных ионов в составе твердых растворов.

Таблица 3 - Магнитные характеристики твердых растворов исследуемых систем Gd_4Sb_3 - Ln_4Sb_3 ($Ln = Tb, Dy$)
 Table 3 – Magnetic characteristics of solid solutions of the investigated Gd_4Sb_3 – Ln_4Sb_3 systems ($Ln = Tb, Dy$)

Твердые растворы	$\chi_m \times 10^6$ при 298 К	θ_p , К	$\mu_{эфф.} \times 10^{24}$, А·м ²
1	2	3	4
Твердые растворы системы Gd_4Sb_3 - Tb_4Sb_3			
$Gd_{3.6}Tb_{0.4}Sb_3$	150463.5	245	74.30
$Gd_{3.2}Tb_{0.8}Sb_3$	189156.4	254	75.95
$Gd_{2.8}Tb_{1.2}Sb_3$	216682.2	258	77.53
$Gd_{2.4}Tb_{1.6}Sb_3$	275615.2	265	79.38
$Gd_2Tb_2Sb_3$	164604.0	240	81.33
$Gd_{1.6}Tb_{2.4}Sb_3$	133286.4	226	81.61
$Gd_{1.2}Tb_{2.8}Sb_3$	116360.2	210	84.20
$Gd_{0.8}Tb_{3.2}Sb_3$	106957.2	198	86.24
$Gd_{0.4}Tb_{3.6}Sb_3$	98023.52	184	88.10
Твердые растворы системы Gd_4Sb_3 - Dy_4Sb_3			
$Gd_{3.6}Dy_{0.4}Sb_3$	150463.5	238	77.62
$Gd_{3.2}Dy_{0.8}Sb_3$	189156.4	242	77.34
$Gd_{2.8}Dy_{1.2}Sb_3$	216682.2	254	70.76
$Gd_{2.4}Dy_{1.6}Sb_3$	275615.2	240	78.17
$Gd_2Dy_2Sb_3$	164604.0	228	80.2
$Gd_{1.6}Dy_{2.4}Sb_3$	133286.4	216	77.8
$Gd_{1.2}Dy_{2.8}Sb_3$	116360.2	186	83.18
$Gd_{0.8}Dy_{3.2}Sb_3$	106957.2	154	96.54
$Gd_{0.4}Dy_{3.6}Sb_3$	98023.52	145	99.04

Заклучение

Полученные и исследованные твердые растворы на основе соединений Gd_4Sb_3 , Tb_4Sb_3 и Dy_4Sb_3 демонстрируют магнитные свойства, близкие к свойствам чистых редкоземельных металлов, что выражается в высоких значениях парамагнитной температуры Кюри и эффективного магнитного момента. Полученные результаты свидетельствуют о возможности применения данных материалов в тех областях науки и техники, где используются редкоземельные материалы. В частности, они могут быть использованы в качестве наконечников магнитных сверхпроводящих соленоидов. Кроме того, твердые растворы с высокими значениями парамагнитной температуры Кюри, могут найти применение в криогенных устройствах для повышения магнитного потока в установках, работающих как при температурах жидкого азота, так и при гелиевых температурах. Также данные твердые растворы могут использоваться в качестве добавок к магнитным материалам для увеличения магнитной индукции [2, 4].

Рецензент: Тайбуллаева З.Х. — д.т.н., профессор кафедры «Технология химических производств» ТПУ имени академика М.С. Осими.

Литература

1. Белов, К.П. Редкоземельные магнетики и их применение. /К.П. Белов. -М.: Наука, 1980. – 239 с.
2. Назаров, Х. Х. Твердые растворы систем Gd_4Sb_3 - Ln_4Sb_3 ($Ln=Pr, Nd, Tb, Dy, Yb$) и Tb_4Sb_3 - Dy_4Sb_3 : специальность 02.00.04 "Физическая химия" : диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук / Назаров Хайрулло Холназарович. – Душанбе, 2006. – 122 с. – EDN NNRXFN.
3. Абулхаев, В. Д. Кристаллохимические характеристики и магнитные свойства антимонидов состава Gd_4Sb_3 - Ln_4Sb_3 ($Ln = Tb, Dy$) / В. Д. Абулхаев, Х. Х. Назарзода // Вестник Бохтарского государственного университета имени Носира Хусрава. Серия естественных наук. – 2025. – № 2-1(132). – С. 64-68. – EDN DZFHFK.
4. Назарзода, Х.Х. Твердые растворы антимонидов и висмутидов редкоземельных элементов. Дис... д-ра. тех. наук. /Х.Х. Назарзода. Душанбе. 2021.-310с.
5. Савицкий, Е.М. Металловедение редкоземельных металлов/ Е.М.Савицкий, В.Ф.Терехова. -М.: Наука. 1975. -270 с.
6. Диаграмма состояния системы Tb_4Sb_3 - Nd_4Sb_3 / В. Д. Абулхаев, М. А. Балаев, И. Н. Ганиев [и др.] // Известия Национальной академии наук Таджикистана. Отделение физико-математических, химических, геологических и технических наук. – 2023. – № 3(192). – С. 91-96. – EDN ZEEGVR.
7. Абулхаев, В. Д. Кристаллохимические характеристики и магнитные свойства антимонидов состава Gd_4Sb_3 - Ln_4Sb_3 ($Ln = Tb, Dy$) / В. Д. Абулхаев, Х. Х. Назарзода // Вестник Бохтарского государственного университета имени Носира Хусрава. Серия естественных наук. – 2025. – № 2-1(132). – С. 64-68. – EDN DZFHFK.

8. Назарзода Х.Х. Твердые растворы на основе антимонидов Tb_4Sb_3 , Nd_4Sb_3 и их электрофизические свойства. /Абулхаев В.Д., Балаев М.А., Ганиев И.Н., Назарзода Х.Х., Сайдалиев Б.Д., Убайдов С.О.// Доклады НАНТ. Душанбе 2023г., том 66, №11-12 с 705-711.

9. Недома, И. Расшифровка рентгенограмм порошков /И. Недома. -М.: Металлургия. 1975. -423 с.

10. Миркин, Л.И. Справочник по рентгеноструктурному анализу поликристаллов /Л.И. Миркин. -М.: Физматгиз. 1961. -863 с.

11. Чечерников, В.И. Установка с использованием магнитных весов. Магнитные измерения/Чечерников В.И. - М.: Изд. МГУ. 1963. с. 92-94.

References

1. Belov, K.P. Rare-Earth Magnets and Their Applications. Moscow: Nauka Publ., 1980. 239 p.

2. Nazarov, Kh.Kh. Solid Solutions of the Gd_4Sb_3 – Ln_4Sb_3 ($Ln = Pr, Nd, Tb, Dy, Yb$) and Tb_4Sb_3 – Dy_4Sb_3 Systems: Dissertation for the Degree of Candidate of Technical Sciences, specialty 02.00.04 “Physical Chemistry”. Dushanbe, 2006. 122 p. EDN NNRXFN.

3. Abulkhaev, V.D., Nazarzoda, Kh.Kh. Crystal-Chemical Characteristics and Magnetic Properties of Antimonides of the Gd_4Sb_3 – Ln_4Sb_3 ($Ln = Tb, Dy$) Composition // Bulletin of Nosir Khusrav Bokhtar State University. Series of Natural Sciences. – 2025. – No. 2-1(132). – P. 64–68. EDN DZFHFHFK.

4. Nazarzoda, Kh.Kh. Solid Solutions of Antimonides and Bismuthides of Rare-Earth Elements: Dissertation for the Degree of Doctor of Technical Sciences. Dushanbe, 2021. 310 p.

5. Savitsky, E.M., Terekhova, V.F. Metallurgy of Rare-Earth Metals. Moscow: Nauka Publ., 1975. 270 p.

6. Abulkhaev, V.D., Balaev, M.A., Ganiev, I.N. et al. Phase Diagram of the Tb_4Sb_3 – Nd_4Sb_3 System // Proceedings of the National Academy of Sciences of Tajikistan. Department of Physical-Mathematical, Chemical, Geological and Technical Sciences. – 2023. – No. 3(192). – P. 91–96.

7. Abulkhaev, V.D., Nazarzoda, Kh.Kh. Crystal-Chemical Characteristics and Magnetic Properties of Antimonides of the Gd_4Sb_3 – Ln_4Sb_3 ($Ln = Tb, Dy$) Composition // Bulletin of Nosir Khusrav Bokhtar State University. Series of Natural Sciences. – 2025. – No. 2-1(132). – P. 64–68.

8. Nazarzoda, Kh.Kh. Solid Solutions Based on Tb_4Sb_3 and Nd_4Sb_3 Antimonides and Their Electrophysical Properties / V.D. Abulkhaev, M.A. Balaev, I.N. Ganiev, Kh.Kh. Nazarzoda, B.D. Saidaliev, S.O. Ubaidov // Reports of the National Academy of Sciences of Tajikistan. – Dushanbe, 2023. – Vol. 66. – No. 11–12. – P. 705–711.

9. Nedoma, I. Decoding of X-Ray Diffraction Patterns of Powders. Moscow: Metallurgiya Publ., 1975. 423 p.

10. Mirkin, L.I. Handbook on X-Ray Structural Analysis of Polycrystals. Moscow: Fizmatgiz Publ., 1961. 863 p.

11. Chechernikov, V.I. Magnetic Balance-Based Installation. Magnetic Measurements. Moscow: Moscow State University Publ., 1963. P. 92–94.

МАЪЛУМОТ ДАР БОРАИ МУАЛЛИФ – СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРЕ –INFORMATION ABOUT AUTHOR

TJ	RU	EN
Абулхаев Владимир Чалолович	Абулхаев Владимир Джалолович	Abulkhaev Vladimir Jalolovich
доктори илмҳои кимиё, профессор	доктор химических наук, профессор	Doctor of Chemical Sciences, Professor,
Институти кимиёи АМИТ ба номи В.И. Никитин	Институт химии им. В.И. Никитина НАНТ	Institute of Chemistry named after V.I. Nikitina NAST
E. mail: abulkhaev-48@mail.ru		
TJ	RU	EN
Назарзода Хайрулло Холназар	Назарзода Хайрулло Холназар	Nazarzoda Khayrullo Kholnazar
доктори илмҳои техника, профессор	доктор технических, профессор	doctor of technical sciences,
Донишгоҳи давлатии тиҷорати Тоҷикистон	Таджикский государственный университет коммерции	Tajik state university of commerce
E. mail: nazarov-h2013@mail.ru		
TJ	RU	EN
Раҳимов Хуршед Абдуллоевич	Рахимов Хуршед Абдуллоевич	Rakhimov Khurshed Abdulloevich
номзади илмҳои техника	кандидат технических наук	Candidate of Technical Sciences.
Донишқадаи энергетикӣ Тоҷикистон	Институт энергетикӣ Таджикистана	Institute of energy of Tajikistan
E. mail: kh.rakhimov.69@mail.ru		

КОМПЬЮТЕРНОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ ИССЛЕДОВАНИЯ ТЕМПЕРАТУРНОЙ ЗАВИСИМОСТИ КОЭФФИЦИЕНТОВ ВЯЗКОСТИ И ПЛОТНОСТИ 1,4-БЕНЗОДИОКСАНА

¹М.Б. Акрамов, ²М. Бахтовар, ²И.О. Мирзода

¹ Центр инновационного развития науки и цифровых технологий НАНТ, Душанбе, Таджикистан

² Таджикский государственный педагогический университет имени С. Айни, Душанбе, Таджикистан

В статье представлены результаты исследования температурной зависимости коэффициентов динамической (η) и кинематической (ν) вязкостей, а также плотности (ρ) 1,4-бензодиоксана. Проведено экспериментальное изучение изменения характеристик соединения при различных температурных режимах. На основе полученных данных построены графические зависимости коэффициентов вязкости от температуры и выявлены закономерности их изменения. Для математического описания экспериментальных результатов применена аналитическая программа Sigma Plot, с помощью которой разработаны компьютерно-математические модели в виде регрессионных уравнений. Полученные уравнения позволяют прогнозировать значения вязкости 1,4-бензодиоксана при заданных температурах и могут быть использованы при расчёте технологических процессов. Результаты исследования представляют интерес для химии и медицины, где 1,4-диоксановое кольцо применяется при синтезе сложных и труднодоступных производных.

Ключевые слова: 1,4-бензодиоксан, нагрев, температура, вязкость, плотность, модель.

МОДЕЛИ КОМПЬЮТЕРИИ НАТИҶАҲОИ ТАҲҚИҚОТИ ВОБАСТАГИИ КОЭФФИЦИЕНТҲОИ ЧАСПАКИ ВА ЗИЧИИ 1,4-БЕНЗОДИОКСАН АЗ ҲАРОРАТ

¹М.Б. Акрамов, ²М. Бахтовар, ²И.О. Мирзода

¹ Маркази рушди инноватсионии илм ва технологияҳои рақамии АМИТ, ш. Душанбе, Ҷумҳурии Тоҷикистон

² Донишгоҳи давлатии омӯзгории Тоҷикистон ба номи С. Айни, ш. Душанбе, Ҷумҳурии Тоҷикистон

Дар мақола натиҷаҳои таҳқиқи вобастагии ҳароратии коэффитсиентҳои часпакии динамики (η) ва кинематикӣ (ν), инчунин зичии (ρ) 1,4-бензодиоксан пешниҳод шудаанд. Тағйирёбии хусусиятҳои пайвастагӣ дар шароити гуногуни ҳароратӣ ба таври таҷрибавӣ омӯхта шудааст. Дар асоси маълумоти бадастомада вобастагии графикии коэффитсиентҳои часпакӣ аз ҳарорат сохта шуда, қонуниятҳои тағйирёбии онҳо муайян карда шуданд. Барои тавсифи математикии натиҷаҳои таҷрибавӣ барномаи таҳлилии Sigma Plot истифода гардида, бо ёрии он моделҳои компютерӣ-математикӣ дар шакли муодилаҳои регрессионӣ таҳия карда шуданд. Муодилаҳои бадастомада имконият медиҳанд, ки қиматҳои часпакии 1,4-бензодиоксан дар ҳароратҳои муайян пешгӯӣ карда шуда, хангоми ҳисобкунии равандҳои технологӣ истифода шаванд. Натиҷаҳои таҳқиқот барои соҳаҳои химия ва тиб аҳамияти илмӣ ва амалӣ доранд, ки дар онҳо ҳалқаи 1,4-диоксанӣ хангоми синтези ҳосилаҳои мураккаб ва душвордастраси он истифода мегардад.

Калимаҳои калидӣ: 1,4-бензодиоксан, гармӣ, ҳарорат, часпакӣ, зичӣ, модел.

COMPUTER SIMULATION OF THE RESULTS OF THE RESEARCH OF THE TEMPERATURE DEPENDENCE OF THE VISCOSITY AND DENSITY COEFFICIENTS OF 1,4-BENZODIOXANE M. B. Akramov, M. Bakhtovar, I.O. Mirzoda

¹ Center for Innovative Development of Science and Digital Technologies, NAST, Dushanbe, Tajikistan

² Tajik State Pedagogical University named after S. Aini, Dushanbe, Tajikistan

The article presents the results of a study on the temperature dependence of the dynamic (η) and kinematic (ν) viscosity coefficients, as well as the density (ρ) of 1,4-benzodioxane. An experimental investigation of changes in the characteristics of the compound under different temperature conditions was carried out. Based on the obtained data, graphical dependences of viscosity coefficients on temperature were constructed, and the regularities of their variation were determined. For the mathematical description of the experimental results, the analytical program SigmaPlot was applied, using which computer-mathematical models in the form of regression equations were developed. The obtained equations make it possible to predict the viscosity values of 1,4-benzodioxane at specified temperatures and can be used in the calculation of technological processes. The results of the study are of interest for chemistry and medicine, where the 1,4-dioxane ring is used in the synthesis of complex and difficult-to-access derivatives.

Keywords: 1,4-benzodioxane, heating, temperature, viscosity, density, model.

Введение

Бензо-1,4-диоксан (1,4-бензодиоксан) – это бесцветная жидкость со слабым специфическим запахом. Хорошо растворяется в органических растворителях.

1,4 – бензодиоксан с давних пор применяется в фармацевтике и фармакологии. В медицине 1,4 -бензодиоксан и его производные применяется для производства лекарств. Полученные биологически активные лекарственные средства медики назначают для лечения онкологических,

антидепрессивных, нейролептических и противогипертоических средств для больных. Встречаются работы, в которых производные препарата применены в сельском хозяйстве как гербициды. Исходя из этого, можно подтвердить слова К. Болки «1,4-бензодиоксан, вечнозеленый, универсальный каркас в медицинской химии» [1 – 7].

Из рассмотренных литературных источников известно, что плотность 1,4 - бензодиоксана при комнатной температуре равна $1,142 \pm 0,1 \text{ г / см}^3$. Исследуемый объект относится к ньютоновским жидкостям, то есть обладает присущей им вязкостью, которая не меняется при изменении силы, приложенной к жидкости. Эту характеристическую вязкость можно легко и точно измерить с помощью прибора капиллярного типа, использующего гравитацию для перемещения жидкости. Хотя производные 1,4 - бензодиоксана синтезированы многими авторами и изучены химические характеристики, но их вязкостные характеристики в зависимости от температуры изучены недостаточно широко и желают уточнения. В связи с этим нами исследованы температурные зависимости вязкостных характеристик 1,4-бензодиоксана.

Материалы и методы исследования

Объектом исследования является 1,4-бензодиоксан, синтезированный учеными Института химии им. В. И. Никитина Академии наук Республики Таджикистан [8].

Измерения проводились в лаборатории «Теплотехника» кафедры «Экспериментальная физика» физического факультета Таджикского государственного педагогического университета имени С. Айни. Для измерения плотности применен метод гидростатического взвешивания, а для измерения вязкостных характеристик 1,4-бензодиоксана вискозиметрический метод (вискозиметры Освальда). Комплексная установка по определению реологических, вязкостных и оптических характеристик жидкостей на базе водяного термостата разработана работниками лаборатории теплотехники. Установка по определению реологических, вязкостных и оптических характеристик жидкостей состоит из водяного термостата, заполненного трансформаторным маслом, установленного электродвигателя для перемешивания заполненной жидкости, ртутного термометра, электронных весов, кварцевого поплавка, лампочки, установленной на пробирке для освещения вискозиметра, груши для вискозиметра, рефрактометра ИРФ - 454 БН, капилляров с термостатирующей оболочкой для образования капель исследуемых жидкостей, штатива, мультиметра UNI - T, UT 72В, проводов для подключения мультиметра UNI - T, UT71В к компьютеру и ПЭВМ.

Блок – схема установки приведена на рис. 1.

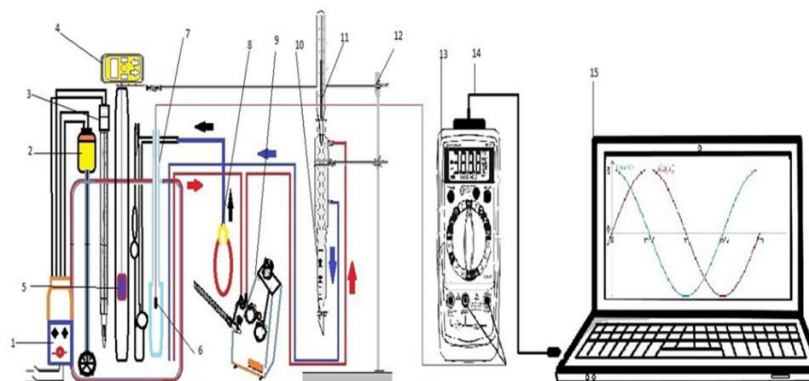


Рисунок 1 - Блок – схема комплексной установки по определению реологических, вязкостных и оптических характеристик жидкостей. 1-термостат водяной, заправленный трансформаторным маслом, 2- электродвигатель, 3- ртутный термометр, 4-электронные весы, 5-кварцевый поплавок, 6-лампочка, 7-пробирка, 8-груша для вискозиметра, 9- рефрактометр ИРФ - 454 БН, 10-капилляр для получения капель, 11-ртутный термометр, 12-штатив, 13-мультиметр UNI - T, UT71В, 14- оптический провод для подключения мультиметра к компьютеру, 15- ПЭВМ

Figure 1 – Block diagram of a complex setup for determining the rheological, viscosity, and optical characteristics of liquids.

1 – water thermostat filled with transformer oil; 2 – electric motor; 3 – mercury thermometer; 4 – electronic balance; 5 – quartz float; 6 – light bulb; 7 – test tube; 8 – rubber bulb for viscometer; 9 – IRF-454 BN refractometer; 10 – capillary for droplet formation; 11 – mercury thermometer; 12 – laboratory stand; 13 – UNI-T UT71B multimeter; 14 – optical cable for connecting the multimeter to a computer; 15 – personal computer (PC).

Принцип работы установки

Вискозиметр Освальда, пробирка для определения плотности методом гидростатического взвешивания, капилляр для образования капель под действием силы тяжести и предметный столик рефрактометра заправляется исследуемой жидкостью. Кварцевый поплавок устанавливают так, чтобы не прикасались к стенкам пробирки, электронными весами определяют массу поплавка в исследуемой жидкости при комнатной температуре. Измеряется вязкость жидкости, коэффициент поверхностного натяжения и показатель преломления по известным методикам при комнатной температуре. Программируя мультиметр UNI - T, UT71B по времени, подключаем режим нагрева. При фиксированных температурах (через 5 или 100 с.) определяются вязкость, коэффициент поверхностного натяжения, плотность и показатель преломления исследуемой жидкости. Все измерения проводятся в режиме охлаждения, так как при нагревании возникает градиент температуры между температурами жидкостей в термостате и анализируемой жидкостью.

Нами, применяя программу Sigma Plot, построены графики зависимостей и рассчитаны коэффициенты регрессионных уравнений зависимостей. Базой для поддержания температуры исследуемой жидкости является водяной термостат, заполненный трансформаторным маслом.

Результаты и обсуждения

Измеренные значения коэффициента вязкости и плотности 1,4-бензодиоксана от температуры приведены в таблице 1.

Таблица 1 - Измеренные значения коэффициента вязкости и плотности 1,4-бензодиоксана от температуры

Table 1 – Measured values of the viscosity coefficient and density of 1,4-benzodioxane as a function of temperature

Измеряемые величины	Измеренные значения коэффициентов								
Температура, К	295	304	316	327	335	347	354	366	373
Плотность, кг/м ³	1142	1110	1080	1060	1043	1023	1007	1001	996
Динамическая вязкость, η ($\times 10^{-6}$ Па с)	1003	862	794	757	727	694	673	661	656
Кинематическая вязкость, ν ($\times 10^{-6}$ м ² /с)	0,878	0,776	0,735	0,714	0,697	0,678	0,668	0,660	0,658

Из полученных данных эксперимента построены графики зависимости коэффициентов от температуры. «Полученные данные обработаны с помощью аналитической программы Sigma Plot» [9]. Зависимость коэффициента динамической вязкости 1,4 -бензодиоксана от температуры приведена на рис. 2. Кинематическая вязкость от температуры зависит, как показано на рис.3. По полученным результатам определены компьютерные модели, которые описываются регрессионными уравнениями третьего порядка.

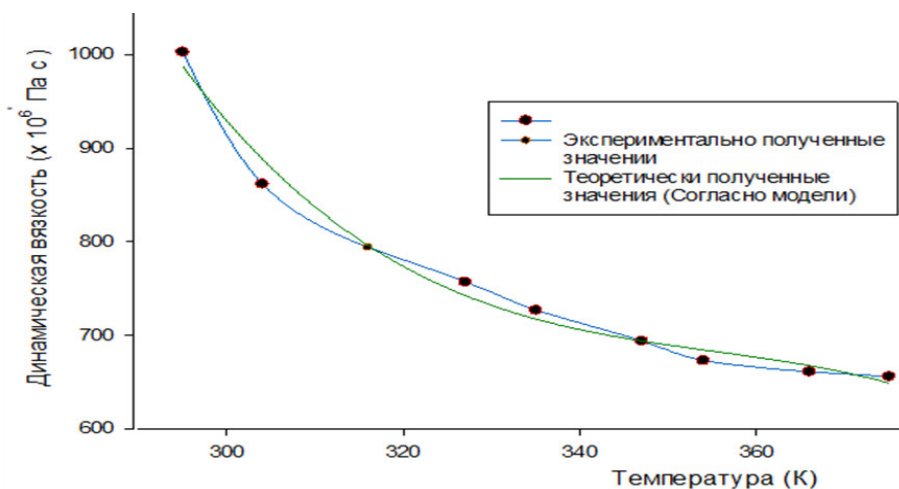


Рисунок 2 - Зависимость динамической вязкости 1,4-бензодиоксана от температуры. Сплошная кривая относится к расчётным значениям согласно модели

Figure 2 – Dependence of the dynamic viscosity of 1,4-benzodioxane on temperature. The solid curve corresponds to the calculated values according to the model

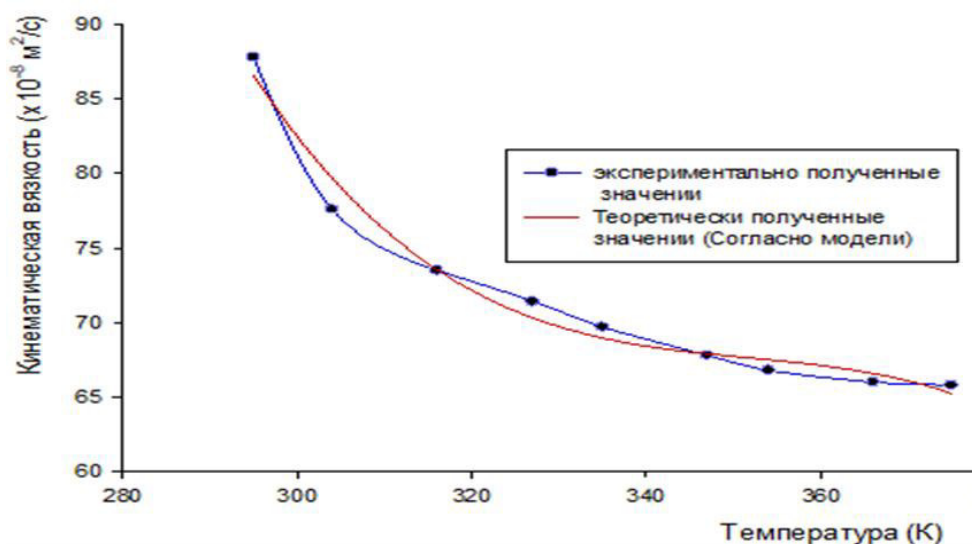


Рисунок 3 – Зависимость кинематической вязкости 1,4-бензодиоксана от температуры

Figure 3 – Dependence of the kinematic viscosity of 1,4-benzodioxane on temperature

Сплошная кривая относится расчётным значениям согласно модели.

Уравнение модели зависимости динамической и кинематической вязкости имеет вид:
для 1,4-бензодиоксана, динамическая вязкость.

$$\eta = y_0 + a \cdot t + b \cdot t^2 + c \cdot t^3 \quad (1)$$

Коэффициент регрессии $R = 0,9929$.

Для 1,4-бензодиоксана, кинематическая вязкость

$$\nu = y_0 + a \cdot t + b \cdot t^2 + c \cdot t^3 \quad (2)$$

Коэффициент регрессии $R = 0,9892$.

Значения коэффициентов регрессионных уравнений приведены в таблице 2.

Таблица 2 - Значения коэффициентов регрессионных уравнений

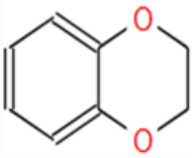
Table 2 – Values of the regression equation coefficients

Коэффициент	Отклонение	t	P
Для уравнения 1			
y_0	От 47990,9076 до 17259,3990	2,7806	0,0389
a	От -397,0902 до 155,4512	-2,5544	0,0510
b	От 1,1146 до 0,4652	2,3959	0,0619
c	От -0,0010 до 0,0005	-2,2616	0,0732
Для уравнения 2			
y_0	От 3864,1734 до 1331,9018	2,9012	0,0337
a	От -32,2747 до 11,9961	-2,6904	0,0433
b	От 0,0916 до 0,0359	2,5519	0,0512
c	От -8,6834E-005 до 3,5702E-005	-2,4322	0,0592

1,4-Бензодиоксан — гетероциклическое соединение, которое широко распространено и имеет важное значение в химии, медицине и других областях. Его производные образуются при замещении атомов водорода в бензольном кольце или других функциональных группах.

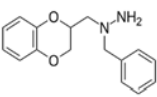
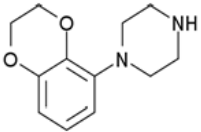
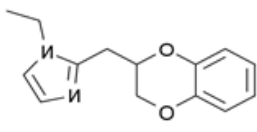
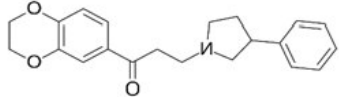
Структурная формула и 3Д-модель молекулы 1.4 – бензодиоксана приведены в таблице 3.

Таблица 3 - Структурная формула и 3D-модель молекулы 1,4 – бензодиоксана
 Table 3 – Structural formula and 3D model of the 1,4-benzodioxane molecule

Формула	Структурная формула 1,4-бензодиоксана	3D-модель 1,4-бензодиоксана
$C_8H_8O_2$		

Знание вязкостных характеристик 1,4-бензодиоксана от температуры необходимо для фармацевтов при синтезировании многих лекарственных препаратов. Для примера в таблице 4 приведены некоторые производные 1,4-бензодиоксана, которые используются в качестве фармацевтических препаратов, в том числе: демоксина, элтопразина, имолаксана и прораксана [10-12].

Таблица 4 - Производные 1,4-бензодиоксана
 Table 4 – Derivatives of 1,4-benzodioxane

Название препарата	Демоксин	Элтопразин	Имолаксан	Пророксан
Структурная формула				

Как видно из структурных формул, в основе всех перечисленных препаратов лежит 1,4 - бензодиоксан. Знание вязкостных свойств 1,4 -бензодиоксана облегчает работу фармацевтов, так как вязкость жидкости – это сопротивление перемещению одного слоя жидкости относительно другого слоя. Вязкость можно оценить при его движении, то есть, когда начинают действовать силы сцепления между молекулами.

Заключение

Анализируя полученные экспериментальные данные, можно заключить, что уменьшение коэффициента кинематической и динамической вязкости с повышением температуры обусловлено межмолекулярными взаимодействиями молекул 1,4-бензодиоксана, что поддерживает нахождение молекул в связанном состоянии в жидкости. При повышении температуры межмолекулярные силы притяжения уменьшаются, которые сопровождаются уменьшением вязкостных характеристик объекта исследования. При повышении температуры молекулы 1,4-бензодиоксана получают кинетическую энергию, достаточную для разрыва межмолекулярных связей. В результате этого потенциальная энергия межмолекулярного взаимодействия (силы притяжения) уменьшается.

Регрессионные уравнения моделей можно использовать в химии и медицине, где применяется 1,4 – диоксановое кольцо для синтеза его труднодоступных производных. Таким образом, при разработке и синтезировании медицинских препаратов на основе 1,4 – бензооксана необходимо учитывать его температурные коэффициенты вязкости.

Рецензент: Зубайдов С — д.э.н., к.т.н., доцент, заведующий отделом Возобновляемых источников энергии Центра инновационного развития науки и цифровых технологий НАНП.

Литература

1. Болки, К. 1,4-Бензодиоксан, вечнозеленый, универсальный каркас в медицинской химии: обзор его недавних применений в разработке лекарств / К. Болки, Ф. Баво, Р. Аппиани // Европейский журнал медицинской химии. – 2020. – Т. 200. – 112419. – С. 1–16.

2. The Use of Stems in the Selection of International Nonproprietary Names (INN) for Pharmaceutical Substances. – Geneva: WHO, 2011.
3. Straniero, V. Chirality / V. Straniero, A. Casiraghi, L. Fumagalli, E. Valoti. – 2018. – Vol. 30. – P. 943–950. – DOI: 10.1002/chir.22968.
4. Yin, X. Organic Letters / X. Yin, Y. Huang, Z. Chen, Y. Hu, L. Tao, Q. Zhao, X.-Q. Dong, X. Zhang. – 2018. – Vol. 20. – P. 4173–4177. – DOI: 10.1021/acs.orglett.8b01469.
5. Rezki, N. Molecules / N. Rezki, A.M. Al-Yahyawi, S.K. Bardaweel, F.F. Al-Blewi, M.R. Aouad. – 2015. – Vol. 20. – P. 16048–16067. – DOI: 10.3390/molecules200916048.
6. Nawrocka, W.P. Wiadomości Chemiczne / W.P. Nawrocka, A. Nowicka. – 2014. – Vol. 68. – P. 981–1008.
7. Авакян, А.С. Некоторые успехи органической и фармацевтической химии / А.С. Авакян, С.О. Вартанян, А.Б. Саргсян // Сборник трудов. – Ереван, 2017. – С. 49–58.
8. Турдиалиев, М.З. Синтез и химические превращения некоторых производных 1,4-бензодиоксана: диссертация / М.З. Турдиалиев. – Душанбе, 2019. – 107 с.
9. Мирон, И.О. Влияние кремния и легирования на механические свойства сплавов алюминия системы / И.О. Мирон // Политехнический вестник. Серия: Инженерные исследования. – 2023. – № 2(62). – С. 87–94.
10. Канюков, В.Н. Демодекоз глаз: проблемы и пути решения / В.Н. Канюков, В.К. Банников, Е.К. Мальгина // Офтальмохирургия. – 2015. – № 1. – С. 48–52.
11. Кузнецова, Е.Г. Влияние пренатального стресса на половое возбуждение и половую ориентацию самцов мышей / Е.Г. Кузнецова, Т.Г. Амстиславская, В.В. Булыгина, Н.К. Попова // Российский физиологический журнал им. И.М. Сеченова. – 2006. – Т. 92. – № 1. – С. 123–132.
12. Нифонтова, Г.О. Получение «плавающих» таблеток с пролонгированным высвобождением пропранолола / Г.О. Нифонтова, С.П. Кречетов, О.В. Долотова и др. // Фармация. – 2017. – № 1. – С. 37–41.

References

1. Bolki, K. 1,4-Benzodioxane, a Versatile and Universal Scaffold in Medicinal Chemistry: A Review of Its Recent Applications in Drug Discovery / K. Bolki, F. Bavo, R. Appiani // European Journal of Medicinal Chemistry. – 2020. – Vol. 200. – Art. 112419. – P. 1–16.
2. The Use of Stems in the Selection of International Nonproprietary Names (INN) for Pharmaceutical Substances. – Geneva: World Health Organization (WHO), 2011.
3. Straniero, V. Chirality / V. Straniero, A. Casiraghi, L. Fumagalli, E. Valoti. – 2018. – Vol. 30. – P. 943–950. – DOI: 10.1002/chir.22968.
4. Yin, X. Organic Letters / X. Yin, Y. Huang, Z. Chen, Y. Hu, L. Tao, Q. Zhao, X.-Q. Dong, X. Zhang. – 2018. – Vol. 20. – P. 4173–4177. – DOI: 10.1021/acs.orglett.8b01469.
5. Rezki, N. Molecules / N. Rezki, A.M. Al-Yahyawi, S.K. Bardaweel, F.F. Al-Blewi, M.R. Aouad. – 2015. – Vol. 20. – P. 16048–16067. – DOI: 10.3390/molecules200916048.
6. Nawrocka, W.P. Wiadomości Chemiczne / W.P. Nawrocka, A. Nowicka. – 2014. – Vol. 68. – P. 981–1008.
7. Avakyan, A.S. Some Advances in Organic and Pharmaceutical Chemistry / A.S. Avakyan, S.O. Vartanyan, A.B. Sargsyan // Proceedings. – Yerevan, 2017. – P. 49–58.
8. Turdialiev, M.Z. Synthesis and Chemical Transformations of Some 1,4-Benzodioxane Derivatives: Dissertation / M.Z. Turdialiev. – Dushanbe, 2019. – 107 p.
9. Miron, I.O. Effect of Silicon and Alloying on the Mechanical Properties of Aluminum System Alloys / I.O. Miron // Polytechnic Bulletin. Series: Engineering Research. – 2023. – № 2(62). – P. 87–94.
10. Kanyukov, V.N. Ocular Demodicosis: Problems and Solutions / V.N. Kanyukov, V.K. Bannikov, E.K. Maligna // Ophthalmosurgery. – 2015. – № 1. – P. 48–52.
11. Kuznetsova, E.G. Influence of Prenatal Stress on Sexual Arousal and Sexual Orientation of Male Mice / E.G. Kuznetsova, T.G. Amstislavskaya, V.V. Bulygina, N.K. Popova // Russian Journal of Physiology named after I.M. Sechenov. – 2006. – Vol. 92. – № 1. – P. 123–132.

12. Nifontova, G.O. Preparation of Floating Tablets with Prolonged Release of Proroxan / G.O. Nifontova, S.P. Krechetov, O.V. Dolotova et al. // Pharmacy. – 2017. – № 1. – P. 37–41.

МАЪЛУМОТ ДАР БОРАИ МУАЛЛИФОН - СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ - INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

TJ	RU	EN
Акрамов Муҳаммад Бозорович	Акрамов Мухаммад Бозорович	Akramov Muhammad Bozorovich
н.и.ф.- м, дотсент	к.ф.- м.н., доцент	Candidate of Physico-mathematical Sciences, Associate Professor
Маркази рушди инноватсионии илм ва технологияҳои рақамии АМИТ	Центр инновационного развития науки и цифровых технологий НАНТ	Center for Innovative Development of Science and New Technologies
E-mail: akramov60@mail.ru		
ORCID: https://orcid.org/0000-0001-7155-7410		
TJ	RU	EN
Бахтовари Мирзовалӣ	Бахтовари Мирзовали	Bakhtovari Mirzovali
ассистенти кафедра	Ассистент кафедры	Assistant of the Department
Донишгоҳи давлатии педагогии Тоҷикистон ба номи С. Айни, кафедраи физикаи таҷрибавӣ	Таджикский государственный педагогический университет имени С. Айни, кафедра Экспериментальная физика	S. Aini Tajik State Pedagogical University, Department of Experimental Physics
	E-mail: bahtovarim@mail.ru	
TJ	RU	EN
Мирзода Ислон Ояхмад	Мирзода Ислон Ояхмад	Mirzoda Islom Oyakhmad
ассистенти кафедра	Ассистент кафедры	Assistant of the Department
Донишгоҳи давлатии педагогии Тоҷикистон ба номи С. Айни, кафедраи физикаи таҷрибавӣ	Таджикский государственный педагогический университет имени С. Айни, кафедра Экспериментальная физика	S. Aini Tajik State Pedagogical University, Department of Experimental Physics
E-mail: mp.kulob@mail.ru		
ORCID: https://orcid.org/0009-0007-7641-5922		

КОМПЛЕКСООБРАЗОВАНИЕ СЕРЕБРА (I) С 2-МЕРКАПТОИМИДАЗОЛ В ВОДНО-ДИМЕТИЛФОРМАМИДНЫХ РАСТВОРАХ

А.С. Содатдинова, Б.С. Сурайё, С.И. Сафаров, К.С. Мабаткадамзода, С.М. Сафармамадзода

Таджикский национальный университет, г. Душанбе, Таджикистан

В работе исследовано комплексобразование ионов серебра(I) с 2-меркаптоимидазолом в водно-диметилформамидных растворах при варьировании состава среды и ионной силы. Проанализировано влияние доли диметилформамида (25–75 об.%) на устойчивость образующихся комплексов: установлено, что при 50 об.% ДМФА константы устойчивости проходят через минимум, а при увеличении доли ДМФА до 75 об.% - возрастают. Изучено ступенчатое формирование трёх комплексных форм серебра(I): $[Ag(2MI)]^+$, $[Ag(2MI)_2]^+$ и $[Ag(2MI)_3]^+$ - на основании данных потенциометрического титрования с фиксацией снижения электродного потенциала от 459 до 188 мВ. Определены общие константы устойчивости ($lg\beta_1$, $lg\beta_2$, $lg\beta_3$) для каждой из форм при двух значениях ионной силы (0,1 и 0,2 моль/л), выявлено, что снижение ионной силы приводит к уменьшению эффективных констант из-за ослабления электростатических взаимодействий. Выявлено, что 2-меркаптоимидазол в среде с 25 об.% ДМФА проявляет свойства слабого основания: величина pK_a составила $3,77 \pm 0,04$ при 298 К. Сформированы распределительные диаграммы протонированных, молекулярных и депротонированных форм лиганда в широком диапазоне pH, позволившие установить области доминирования каждой формы. Представлены результаты pH-метрического титрования при разных температурах, обосновано влияние температурного фактора на константу ионизации лиганда.

Ключевые слова: серебро, 2-меркаптоимидазол, диметилформамид, общие константы устойчивости, неводный растворитель.

КОМПЛЕКСҲОСИЛКУНИИ НУҚРАИ (I) БО 2-МЕРКАПТОИМИДАЗОЛ ДАР МАҲЛУЛҲОИ ОБИ-ДИМЕТИЛФОРМАМИДИ

А.С. Содатдинова, Б.С. Сурайё, С.И. Сафаров, К.С. Мабаткадамзода, С.М. Сафармамадзода

Донишгоҳи миллии Тоҷикистон, ш. Душанбе, Ҷумҳурии Тоҷикистон

Дар кор раванди комплексҳосилшавии ионҳои нуқра(I) бо 2-меркаптоимидазол дар маҳлулҳои обӣ-диметилформамидӣ ҳангоми тағйир ёфтани таркиби муҳит ва қувваи ионӣ тадқиқ карда шудааст. Таъсири ҳиссаи диметилформамид (25–75 % ҳаҷмӣ) ба устувории комплексҳои ҳосилшаванда таҳлил карда шуд: муайян гардид, ки дар 50 % ҳаҷмии ДМФА константаҳои устуворӣ аз минимум мегузаранд, вале бо зиёд шудани ҳиссаи ДМФА то 75 % ҳаҷмӣ – меафзоянд. Ташаккули зинагии се шакли комплекси нуқра $[Ag(2MI)]^+$, $[Ag(2MI)_2]^+$ и $[Ag(2MI)_3]^+$ - дар асоси маълумоти титрикунонии потенциометрӣ бо сабти қоҳиши потенциали электродӣ аз 459 то 188 мВ омӯхта шудааст. Константаҳои умумии устуворӣ ($lg\beta_1$, $lg\beta_2$, $lg\beta_3$) барои ҳар як шакл дар ду қимати қувваи ионӣ (0,1 ва 0,2 моль/л) муайян карда шуданд; ошкор гардид, ки қоҳиши қувваи ионӣ аз сабаби заиф шудани таъсири мутақобилаи электростатикӣ ба кам шудани константаҳои эффективӣ оварда мерасонад. Муайян карда шуд, ки 2-меркаптоимидазол дар муҳити дорои 25 % ҳаҷмии ДМФА ҳосиятҳои асосӣ заифро зоҳир мекунад: қимати pK_a дар ҳарорати 298 К ба $3,77 \pm 0,04$ К баробар шуд. Диаграммаҳои тақсими шаклҳои протониронидашуда, молекулавӣ ва депротониронидашудаи лиганд дар доираи васеи pH сохта шуданд, ки имкон доданд соҳаҳои бартарии ҳар як шакл муайян карда шаванд. Натиҷаҳои титрикунонии pH-метрӣ дар ҳароратҳои гуногун пешниҳод гардида, таъсири омили ҳарорат ба константаи ионизатсияи лиганд асоснок карда шудааст.

Калидвожаҳо: нуқра, 2-меркаптоимидазол, диметилформамид, собитаҳои умумии устуворӣ, ҳалкунандаи ғайриобӣ.

SILVER(I) COMPLEXATION WITH 2-MERCAPTOIMIDAZOLE IN AQUEOUS-DIMETHYLFORMAMIDE SOLUTIONS

A.S. Sodatdinova, B.S. Surayo, S.I. Safarov, K.S. Mabatkadamzoda, S.M. Safarmamadzoda

Tajik National University, Dushanbe, Tajikistan

The article presents the results of the study of the complex formation of silver(I) ions with 2-mercaptoimidazole in aqueous–dimethylformamide solutions with varying solvent composition and ionic strength. The effect of the dimethylformamide content (25–75 vol.%) on the stability of the formed complexes was analyzed. It was established that at 50 vol.% DMF the stability constants reach a minimum, while increasing the DMF content to 75 vol.% leads to their growth. The stepwise formation of three silver(I) complex species, $[Ag(2MI)]^+$, $[Ag(2MI)_2]^+$, and $[Ag(2MI)_3]^+$, was studied based on potentiometric titration data, accompanied by a decrease in electrode potential from 459 to 188 mV. The overall stability constants ($lg\beta_1$, $lg\beta_2$, $lg\beta_3$) were determined for each complex form at two ionic strength values (0.1 and 0.2 mol/L). It was found that a decrease in ionic strength results in a reduction of the effective stability constants due to weakening of electrostatic interactions. It was shown that 2-mercaptoimidazole in a medium containing 25 vol.% DMF exhibits weak base properties, with the pK_a value equal to 3.77 ± 0.04 at 298 K. Distribution diagrams of protonated, molecular, and deprotonated ligand forms over a wide pH range were constructed, allowing the determination of the predominance regions of each form. The results of pH-metric titration at different temperatures are presented, and the

influence of temperature on the ligand ionization constant is substantiated.

Keywords: silver, 2-mercaptoimidazole, dimethylformamide, general stability constants, nonaqueous solvent.

Введение

Имидазол и его производные имеют биологическую активность и широкое применение в химии и медицине. В литературе имеются сведения о комплекс образованиях ионов серебра с различными азот и серосодержащими органическими лигандами, как в водных, так и водно-органических растворах переменного состава. В работах [1-3] авторами исследованы кислотно-основные свойства 1-метил-2-меркаптоимидазола, 2-меркаптоимидазола и их комплексообразующие способности с серебром в водно-органических растворах. В работах [1-3] авторами исследованы кислотно-основные свойства 1-метил-2-меркаптоимидазола (1-М-2-МКИАЗ), 2-меркаптоимидазола (2-МКИАЗ) и их комплексообразующие способности с серебром в водно-органических растворах. С применением метода межфазного распределения авторами определены коэффициенты распределения и изменения ΔG_{tr} переноса 1-М-2-МКИАЗ из воды в водно-этанольные растворители. Выявлено, что ΔG_{tr} для данного лиганда имеют положительные значения не зависимо от содержания этанола в растворах. Наряду с этим увеличение концентрации растворителя приводит к уменьшению ΔG_{tr} 1-метил-2-меркаптоимидазола. Данные о комплексообразовании серебра с триазолами обсуждается в работе [4]. Показано, что в интервале 288-318K и ионной силе раствора равной 0,25 моль/л серебра (I) с 1,2,4-триазолом последовательно образует моно, двух и трехзамещенные комплексы. С увеличением температуры величины общих констант устойчивости снижаются. Авторами работ [5,6] изучено комплексообразование серебра (I) с 2-МКИАЗ в водно-спиртовом растворе. При этом найдено число образуемых комплексных форм серебра и их константы устойчивости. Представлена диаграмма распределения протонированных, депротонированных и молекулярных форм 2-меркаптобензимидазола в широком диапазоне pH. Выявлено, что при взаимодействии серебра с 2-меркаптобензимидазолом (2-МКБИАЗ) получаются две комплексные формы, для которых рассчитаны константы их устойчивости в зависимости от температуры опыта и содержания спирта в растворе. Показано, что возрастание содержания спирта в растворе приводит к стабилизации комплексов серебра с 2-меркаптобензимидазолом. Показано, что возрастание содержания спирта в растворе приводит к стабилизации комплексов серебра с 2-МКБИАЗ. Анализ литературы показал, что комплексообразование серебра 2-меркаптоимидазолом в водно-диметилформамидном растворе остается неизученным.

Целью настоящей работы явилось изучение комплексообразования серебра 2-меркаптоимидазолом в водно-диметилформамидных растворах и установлено влияние состава растворителя на устойчивость, образующихся комплексов.

Материалы и методы исследования

Методом pH-метрического титрования проводилось изучение кислотно-основных свойств 2-меркаптоимидазола в воде и водно-органических растворителях в термостатируемой ячейке в соответствии с методикой [3]. Температуру в ячейке поддерживали с точностью $\pm 0.1^\circ\text{C}$. Концентрация 2МИ была равна 0,01 моль/л, а металла комплексообразователя $1 \cdot 10^{-4}$ моль/л. Ионную силу создавали перхлоратом натрия. Методика pH-метрического титрования 2-меркаптоимидазола в водно-диметилформамидных растворителях была разработана таким образом, что при титровании соляную кислоту до нужной концентрации разводили соответствующим органическим растворителем. Методика потенциометрического титрования описана в работе [10]. С помощью pH-метра марки PH-150МИ измеряли потенциал гальванического элемента. Температуру в ячейке поддерживали постоянной при помощи водяного термостата ($\pm 0.1^\circ\text{C}$). Концентрации исходных веществ и продуктов реакции, и константы устойчивости определяли по программе KEV [7].

Результаты исследования и их обсуждения

Данные по определению кислотно-основных свойств 2-меркаптоимидазола в водно-диметилформамидных растворах представлены в таблице 1 при 298,15.

Таблица 1- Данные по определению кислотно-основных свойств 2-метиимидазола представлены в р таблице 1. при 298,15; J=0.1 моль/л NaClO₄ C_{2MI}=0,01моль/л. V_{общ.} = 25мл

Table 1 – Data on the determination of the acid–base properties of 2-mercaptoimidazole are presented in Table 1 at 298.15 K; I = 0.1 mol/L NaClO₄; C_{2MI} = 0.01 mol/L; V_{total} = 25 mL

Титрант: 0.1н раствор HCl	pH	[2MI] · 10 ⁴ , моль/л	[H ₂ MI ⁺] · 10 ³ , моль/л	pK _a
0	4,28		10	-
0,1	4,26	3,98	9,56	2,88
0,2	4,21	7,94	9,13	3,15
0,3	4,14	11,9	8,70	3,27
0,4	4,09	15,7	8,27	3,37
0,5	4,04	19,6	7,84	3,44
0,6	4,00	23,4	7,42	3,50
0,7	3,95	27,2	7,00	3,54
0,8	3,91	31,0	6,59	3,58
0,9	3,87	34,7	6,18	3,62
1,0	3,83	38,5	5,77	3,65
1,1	3,79	42,1	5,36	3,69
1,2	3,75	45,8	4,96	3,72
1,3	3,72	49,4	4,56	3,75
1,4	3,68	53,0	4,17	3,78
1,5	3,65	56,6	3,77	3,83
1,6	3,62	60,2	3,38	3,87
1,7	3,59	63,7	3,00	3,92
1,8	3,56	67,2	2,61	3,97
1,9	3,53	70,6	2,23	4,03
2,0	3,50	74,1	1,85	4,10
2,1	3,47	77,5	1,48	4,19
2,2	3,44	80,9	1,10	4,31
2,3	3,42	84,2	0,73	4,48
2,4	3,40	87,6	0,37	4,78

Величина констант ионизации для 2-меркаптоимидазола в водно-диметилформаидных растворах содержащих 25%.об. ДМФА при 298К оказалась равной 3,77±0,04. Из полученных результатов выявлено, что 2 -меркаптоимидазол относится к слабым основаниям.

С применением экспериментальных результатов, полученных при титровании 2-МИ в растворе диметилформаида, были построены распределительные диаграммы данного органического лиганда в широком диапазоне pH при 298,15К. (рис.).

Из диаграммы распределения 2-меркаптоимидазола, установлен максимальный выход протонированных, депротонированных и молекулярных форм изученного органического лиганда в зависимости от pH раствора. Используя величины констант ионизации и данные потенциометрического титрования системы Ag⁺–2-меркаптоимидазол–H₂O–ДМФА, были рассчитаны константы устойчивости образующихся комплексов серебра.

В работе приводятся данные о исследовании протонирования 1-метил-2-меркаптоимидазола в водно-диметилформаидных растворах [8]. Известно, что на константу ионизации влияют различные факторы, в том числе температура. PH-метрическое титрование проведено при разных температурах и в результате показано влияние температуры на константу ионизации лиганда. При этом величина pK_a при 298К в растворе, содержащем 25 об% ДМФА равна 7,94±0,08. Показано, что введение алкильного радикала влияет на константу ионизации имидазолов. Известно, что алкильные радикалы, например метил- или этил- проявляют положительный индуктивный эффект и электронодонные свойства, которые повышают электронную плотность на гетероцикле. В результате основность имидазолов возрастает, а их кислотность уменьшается.

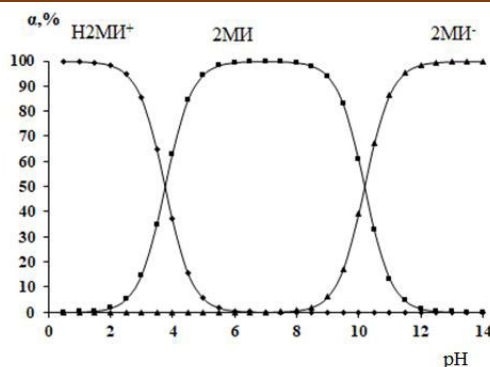
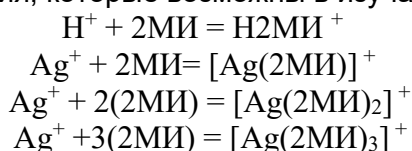


Рисунок – Диаграмма доминирования протонированной, молекулярной и депротонированной форм 2МИ в растворе вода-ДМФА

Figure – Distribution diagram of the predominant protonated, molecular, and deprotonated forms of 2MI in a water-DMF solution

Для определения числа комплексных форм, величин констант по программе KEV учитывались следующие равновесия, которые возможны в изучаемой системе.



В таблице 2 представлены результаты потенциометрического титрования при изучении комплексообразования для системы Ag^+ –2-меркаптоимидазол– H_2O –ДМФА (25об.%) при 25°C.

Таблица 2 - Результаты расчета потенциометрического титрования системы Ag^+ –2-меркаптоимидазол– H_2O –ДМФА при 298K $C_{\text{Ag}^+}=10^{-4}$ моль/л. $C_{2\text{МИ}}=0,01$ моль/л. $J=0.1$ моль/л

Table 2 – Results of the calculation of potentiometric titration of the Ag^+ –2-mercaptoimidazole– H_2O –DMF system at 298 K: $C_{\text{Ag}^+} = 10^{-4}$ mol/L; $C_{2\text{MI}} = 0.01$ mol/L; $I = 0.1$ mol/L

E, мВ	C_{Ag^+} , моль/л	$C_{2\text{МИ}}$, моль/л	C_{Ag^+} , моль/л	$[\text{AgL}]$, моль/л	$[\text{AgL}_2]$, моль/л	$[\text{AgL}_3]$, моль/л
459	9,980E-05	2,000E-05	7,980E-05	2,000E-05	1,272E-10	1,292E-16
422,5	9,960E-05	3,980E-05	5,981E-05	3,979E-05	6,719E-10	1,812E-15
403,3	9,940E-05	5,960E-05	3,983E-05	5,957E-05	2,262E-09	1,372E-14
391,4	9,920E-05	7,940E-05	1,988E-05	7,931E-05	8,033E-09	1,299E-13
381,8	9,900E-05	9,900E-05	1,425E-06	9,741E-05	1,690E-07	4,684E-11
374,7	9,880E-05	1,190E-04	9,889E-08	9,631E-05	2,381E-06	9,405E-09
367,4	9,860E-05	1,380E-04	4,956E-08	9,399E-05	4,526E-06	3,480E-08
361,2	9,840E-05	1,570E-04	3,247E-08	9,172E-05	6,577E-06	7,532E-08
355,3	9,820E-05	1,770E-04	2,350E-08	8,941E-05	8,637E-06	1,333E-07
349,2	9,800E-05	1,960E-04	1,841E-08	8,728E-05	1,050E-05	2,019E-07
344,3	9,780E-05	2,150E-04	1,500E-08	8,521E-05	1,229E-05	2,830E-07
339,1	9,770E-05	2,340E-04	1,259E-08	8,332E-05	1,399E-05	3,754E-07
335,6	9,750E-05	2,530E-04	1,076E-08	8,139E-05	1,562E-05	4,790E-07
328,1	9,710E-05	2,910E-04	8,215E-09	7,771E-05	1,866E-05	7,159E-07
322,2	9,670E-05	3,290E-04	6,532E-09	7,427E-05	2,144E-05	9,882E-07
318	9,630E-05	3,660E-04	5,371E-09	7,111E-05	2,390E-05	1,283E-06
308,7	9,580E-05	4,210E-04	4,170E-09	6,683E-05	2,720E-05	1,767E-06
303,3	9,520E-05	4,760E-04	3,335E-09	6,284E-05	3,006E-05	2,296E-06
297,1	9,470E-05	5,300E-04	2,744E-09	5,930E-05	3,254E-05	2,852E-06
293	9,420E-05	5,840E-04	2,297E-09	5,605E-05	3,472E-05	3,434E-06
284,3	9,350E-05	6,542E-04	1,860E-09	5,215E-05	3,713E-05	4,221E-06
278,4	9,280E-05	7,236E-04	1,537E-09	4,866E-05	3,911E-05	5,021E-06
274,5	9,210E-05	7,919E-04	1,292E-09	4,553E-05	4,074E-05	5,822E-06
268,7	9,120E-05	8,759E-04	1,060E-09	4,204E-05	4,234E-05	6,811E-06

Окончание таблицы 2

263,9	9,040E-05	9,584E-04	8,859E-10	3,901E-05	4,361E-05	7,785E-06
258,4	8,940E-05	1,055E-03	7,277E-10	3,579E-05	4,469E-05	8,914E-06
253,2	8,850E-05	1,150E-03	6,087E-10	3,302E-05	4,548E-05	1,000E-05
246,4	8,760E-05	1,243E-03	5,164E-10	3,058E-05	4,598E-05	1,104E-05
242	8,670E-05	1,334E-03	4,434E-10	2,842E-05	4,626E-05	1,202E-05
237,7	8,560E-05	1,438E-03	3,756E-10	2,618E-05	4,633E-05	1,309E-05
233,5	8,450E-05	1,554E-03	3,160E-10	2,400E-05	4,626E-05	1,424E-05
229,6	8,320E-05	1,681E-03	2,640E-10	2,185E-05	4,593E-05	1,542E-05
224,8	8,180E-05	1,817E-03	2,198E-10	1,982E-05	4,538E-05	1,659E-05
221,2	7,990E-05	2,013E-03	1,720E-10	1,734E-05	4,440E-05	1,815E-05
216,5	7,800E-05	2,200E-03	1,381E-10	1,533E-05	4,321E-05	1,946E-05
211,7	7,620E-05	2,378E-03	1,133E-10	1,368E-05	4,196E-05	2,055E-05
207,2	7,400E-05	2,604E-03	8,955E-11	1,192E-05	4,031E-05	2,176E-05
200,6	7,080E-05	2,918E-03	6,583E-11	9,904E-06	3,782E-05	2,307E-05
192,9	6,790E-05	3,207E-03	5,057E-11	8,412E-06	3,553E-05	2,396E-05
188,8	6,530E-05	3,473E-03	4,022E-11	7,281E-06	3,346E-05	2,456E-05

Выявлено, что в целом величина электродного потенциала при потенциометрическом титровании уменьшается от 459 до 188 мВ, что свидетельствует о комплексообразовании иона металла с изученным органическим лигандом. Показано, что комплексообразование серебра с изученным органическим лигандом протекает ступенчато с образованием трех 2-меркаптоимидазольных комплексов серебра (I).

Таблица 3-Общие константы устойчивости 2-меркаптоимидазольных комплексов серебра (I) в среде ДМФА J=0,2моль перхлората натрия при 298K

Table 3 – Overall stability constants of silver(I) 2-mercaptoimidazole complexes in DMF medium at I = 0.2 mol/L sodium perchlorate and 298 K

Содержания ДМФА в растворе об.%	$\lg\beta_1$	$\lg\beta_2$	$\lg\beta_3$
25	7,825±0,198	10,977±0,644	13,795±0,573
50	6,738±0,05	11,013±0,06	13,832±0,09
75	9,004±0,189	11,917±0,800	14,776±0,439

С учетом экспериментальных результатов рассчитаны константы устойчивости комплексных форм образующихся при взаимодействии серебра с 2-меркаптоимидазолом в диметилформидных растворах.

По полученным результатам рассчитаны общие константы устойчивости представленных в таблице 2.

Из данных представленных в таблице при переходе от 25 об.% до 75 об.% устойчивость комплексов изменяется. В среде 50 об% ДМФА величина константа устойчивости проходит через минимум. Пре переходе от моно к двум и трехзамещенным комплексам величины $\lg\beta_i$ закономерно увеличиваются. Выявлено, что изменение ионной силы хоть и мало, но оказывает влияние на величины констант устойчивости. Так как ионная сила раствора определяет электростатическое взаимодействие ионов, это приводит к тому, что эффективная константа устойчивости снижается. Наряду с этим нужно отметить, что влияние зависит от заряда комплексообразователя и лиганда, которые участвуют в равновесие комплексообразования.

Таблица 4-Общие константы устойчивости 2-меркаптоимидазольных комплексов серебра (I) в среде ДМФА и J=0.1моль/л перхлората натрия при 298K

Table 4 – Overall stability constants of silver(I) 2-mercaptoimidazole complexes in DMF medium at I = 0.1 mol/L sodium perchlorate and 298 K.

Содержания ДМФА в растворе об.%	$\lg\beta_1$	$\lg\beta_2$	$\lg\beta_3$
25	7,74±0,21	10,88±0,66	13,22±1,54
50	7,78±0,199	11,07±0,475	13,46±0,965

В таблице 4 в качестве иллюстрации представлены константы устойчивости комплексов серебра с 2-меркаптоимидазолом в растворе, содержащем разное количество ДМФА при ионной силе равной 0,1 моль/л [8].

Если при ионной силе равной 0,2 моль/л величина общей констант устойчивости монолигандного комплекса в растворе содержащем 25 об.% ДМФА равна 7,82 то при уменьшении ионной силы (0,1 моль/л) эта величина уменьшается до 7,74.

Сравнение полученных нами данные с литературными показало, что на устойчивость комплексов оказывает влияние также и природа введение заместителя в составе имидазола.

Заклучение

Выявлено влияние содержание диметилформамида на равновесие комплексообразования серебра (I) с 2-меркаптоимидазолом. При разных содержаниях неводного компонента проведён потенциометрическое титрование системы Ag^+ —2-меркаптоимидазол- H_2O . Изменение содержания диметилформамида по-разному влияет на величины констант устойчивости. Установлен ступенчатый характер процесса комплексообразования иона серебра с 2-меркаптоимидазолом в растворе вода-ДМФА. Показано, что не зависимо от концентрации ДМФА в растворе последовательно образуются три комплексные формы серебра. В результате добавление диметилформамида к раствору, получают стабильные смешанные комплексы. При переходе из воды в водно-диметилформамидном растворе происходит пересольватация реагентов.

Рецензент: Джумаев М.П. — к.х.н., доцент кафедры “Общая и неорганическая химия” ТПУ имени С. Айни

Литература

1. Содатдинова, А.С. Комплексообразование серебра(I) с 1-метил-2-меркаптоимидазолом в водно-диметилформамидном растворителе /А.С.Содатдинова // Вестн. Хорог. Универ.-2023. №2(26). С. 94-101.
2. Содатдинова, А.С., Усачёва Т.Р. Сафармамадзода С.М. комплексообразование серебра (I) с 1- метил-2-меркаптоимидазолом в растворителе вода-этанол / А.С.Содатдинова, Т.Р. Усачёва С.М.Сафармамадзода // Известия высших учебных заведений. Серия: химия и химическая технология. -2022. Том. 65. №8. –С.22-31.
3. Мудинов Х.Г., Комплексообразование серебра (I) с 1,2,4-триазолом и 1,2,4-триазолтиолом. Автореф.канд.хим.наук. –Душанбе, 2019. –24с.
4. Сафармамадов С.М., Каримова З.И., Баходуров Ю.Ф., Мабаткадамзода К.С Комплексообразование серебра (I) с 2-меркаптобензимидазолом в водно-этанольных растворах.//Журнал физической химии. 2020. Т. 94. № 6. С. 844-849.
5. Каримова З.И., Баходуров Ю.Ф., Мабаткадамзода К.С. Комплексообразование серебра (I) с 2-меркаптобензимидазолом при 278-318K// *ДАН РТ. 2018. № 9–10. С.759-765.*
6. Mehkov, A.N Gamov G.A. KEV: a free software for calculating the equilibrium composition and determining the equilibrium constant using UV-Vis and potentiometric data. Talanta.2019. V.198. P.200.
7. Содатдинова А.С., Сафармамадзода С.М., Бобокалонов Т.Б. Протонирование 1-метил-2-меркаптотимидазола в водно-ДМФА растворах. В сборнике: Аналитическая химия и её значение в развитии естественных и технических наук. Материалы международной научно-практической конференции. Душанбе, 2025. –С. 118-122.
8. Сурайё С.Б., Содатдинова А.С., Сафармамадзода С.М. Устойчивость комплексов серебра(I) с 2-меркаптоимидазолом в водно-ДМФА растворителей. Материалы международной научно-практической конференции «Комплексные соединения и аспекты их применения». Душанбе, 2025. С. 38-42.

References

1. Sodatdinova, A.S. Complex formation of silver(I) with 1-methyl-2-mercaptoimidazole in an aqueous–dimethylformamide solvent / A.S. Sodatdinova // Vestnik Khorogskogo Universiteta. – 2023. – No. 2(26). – P. 94–101.
2. Sodatdinova, A.S., Usacheva, T.R., Safarmamadzoda, S.M. Complex formation of silver(I) with 1-methyl-2-mercaptoimidazole in a water–ethanol solvent / A.S. Sodatdinova, T.R. Usacheva, S.M. Safarmamadzoda // Proceedings of Higher Educational Institutions. Chemistry and Chemical Technology Series. – 2022. – Vol. 65. – No. 8. – P. 22–31.
3. Mudinov, Kh.G. Complex formation of silver(I) with 1,2,4-triazole and 1,2,4-triazolethiol. Abstract of PhD thesis in Chemistry. – Dushanbe, 2019. – 24 p.
4. Safarmamadov, S.M., Karimova, Z.I., Bahodurov, Yu.F., Mabatkadamdzoda, K.S. Complex formation of silver(I) with 2-mercaptobenzimidazole in aqueous–ethanol solutions // Russian Journal of Physical Chemistry. – 2020. – Vol. 94. – No. 6. – P. 844–849.

5. Karimova, Z.I., Bahodurov, Yu.F., Mabatkadamzoda, K.S. Complex formation of silver(I) with 2-mercaptobenzimidazole at 278–318 K // Reports of the Academy of Sciences of the Republic of Tajikistan. – 2018. – No. 9–10. – P. 759–765.

6. Mehkov, A.N., Gamov, G.A. KEV: A free software for calculating the equilibrium composition and determining the equilibrium constant using UV–Vis and potentiometric data // Talanta. – 2019. – Vol. 198. – P. 200.

7. Sodatdinova, A.S., Safarmamadzoda, S.M., Bobokalonov, T.B. Protonation of 1-methyl-2-mercaptoimidazole in aqueous–DMF solutions // In: Analytical Chemistry and Its Role in the Development of Natural and Technical Sciences. Proceedings of the International Scientific and Practical Conference. – Dushanbe, 2025. – P. 118–122.

8. Surayyo, S.B., Sodatdinova, A.S., Safarmamadzoda, S.M. Stability of silver(I) complexes with 2-mercaptoimidazole in aqueous–DMF solvents // Proceedings of the International Scientific and Practical Conference “Complex Compounds and Aspects of Their Application”. – Dushanbe, 2025. – P. 38–42.

МАЪЛУМОТ ДАР БОРАИ МУАЛИФОН– СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ– ABOUT THE AUTHORS

TJ	RU	EN
Содатдинова Анҷуман Садриддиновна	Содатдинова Анджуман Садриддиновна	Sodatdinova Anjuman Sadriddinovna
н.и.х, ассистент	к.х.н, ассистент	Candidate of Chemical Sciences, Assistant
Донишгоҳи миллии Тоҷикистон	ТНУ	Tajik National University
E.mail: anjuman87@mail.ru https://orcid.org/0000-0001-5934-9918		
TJ	RU	EN
Сурайё Саидумар Бобосайдзода	Сурайё Саидумар Бобосайдзода	Surayyo Saidumar Bobosaidzoda
Доктор PhD, ассистент	Доктор PhD, ассистент	PhD, Assistant
Донишгоҳи миллии Тоҷикистон	ТНУ	Tajik National University
E.mail: bobosaidzodas96@mail.ru https://orcid.org/0009-0004-7617-4338		
TJ	RU	EN
Сафаров Саймухаммад Исломович	Сафаров Саймухаммад Исломович	Safarov Saymukhammad Islomovich
Номзади илмҳои химия, ассистент	Кандидат химических наук, доцент	Candidate of Chemical Sciences, Associate Professor
Донишгоҳи миллии Тоҷикистон	ТНУ	Tajik National University
E.mail: safarov.888@mail.ru https://orcid.org/0009-0004-4919-5707		
TJ	RU	EN
Мабаткадамзода Кимё Сабзикадам	Мабаткадамзода Кимё Сабзикадам	Mabatkadamzoda Kimyo Sabzkadam
Доктори илмҳои химия, дотсент	Доктор химических наук, доцент	Doctor of Chemical Sciences, Associate Professor
Донишгоҳи миллии Тоҷикистон	Таджикский национальный университет	Tajik National University
E.mail: kimyo84@mail.ru https://orcid.org/0009-0003-1682-0484		
TJ	RU	EN
Сафармамадзода Сафармамад Муборакшо	Сафармамадзода Сафармамад Муборакшо	Safarmamadzoda Safarmamad Muboraksho
Доктори илмҳои химия, профессор	Доктор химических наук, профессор	Doctor of chemical sciences, professor
Донишгоҳи миллии Тоҷикистон	ТНУ	Tajik National University
E.mail: sash65@mail.ru https://orcid.org/0000-0002-7125-3262		

НАҚЛИЁТ - ТРАНСПОРТ - TRANSPORT

УДК: 625.76:625.758:005.8(575.3)

DOI: 10.65599/ENG4318

ОПТИМИЗАЦИЯ ЗИМНЕГО СОДЕРЖАНИЯ ГОРНЫХ АВТОМОБИЛЬНЫХ ДОРОГ ПРИ ОГРАНИЧЕННЫХ РЕСУРСАХ**С.Б. Мирзозода**

Таджикский технический университет имени академика М.С. Осими, г. Душанбе, Республика Таджикистан

В статье рассматривается проблема оптимизации зимнего содержания горных автомобильных дорог в условиях ограниченных финансовых, технических и материальных ресурсов. Обоснована актуальность данной задачи для горных регионов, где на состояние дорожной сети одновременно воздействует комплекс зимних природных факторов. Особое внимание уделено условиям Республики Таджикистан, где устойчивость транспортного сообщения во многом зависит от своевременного обслуживания перевальных, социально значимых и аварийно-опасных участков. В статье предложен риск-ориентированный подход к распределению ресурсов зимнего содержания, основанный на учёте транспортной значимости дороги, уровня природно-климатического риска, социальной функции участка, повторяемости закрытий и тяжести последствий возможного прекращения движения. Представлена упрощённая интегральная модель приоритизации участков, позволяющая выделять зоны I, II и III уровня обслуживания. Обоснована необходимость применения превентивных технологий, включая противогололёдную обработку покрытия, погодный мониторинг и предварительное размещение техники и материалов. Сделан вывод, что предложенный подход позволяет повысить эффективность зимнего содержания, снизить риски транспортной изоляции и обеспечить более рациональное использование ограниченных ресурсов дорожных организаций.

Ключевые слова: зимнее содержание дорог, горные автомобильные дороги, ограниченные ресурсы, оптимизация, содержание дорог, риск-ориентированный подход, лавинная опасность, дорожные активы.

ОПТИМИЗАЦИЯ ЗИМНЕГО СОДЕРЖАНИЯ ГОРНЫХ АВТОМОБИЛЬНЫХ ДОРОГ ПРИ ОГРАНИЧЕННЫХ РЕСУРСАХ**С.Б. Мирзозода**

Донишгоҳи техникии Тоҷикистон ба номи академик М.С. Осимӣ, ш. Душанбе, Ҷумҳурии Тоҷикистон

Дар мақола масъалаи оптимизатсияи нигоҳдории фасли зимистон дар роҳҳои автомобилгарди кӯҳӣ дар шароити маҳдудияти манбаҳои молиявӣ, техникаӣ ва моддӣ баррасӣ карда мешавад. Асоснок карда шудааст, ки ин масъала барои минтақаҳои кӯҳӣ аҳамияти махсус дорад, зеро ба ҳолати шабакаи роҳҳо ҳамзамон маҷмӯи омилҳои табиӣ фасли зимистон таъсир мерасонанд. Дикқати махсус ба шароити Ҷумҳурии Тоҷикистон дода шудааст, ки дар он устувории алоқаи нақлиётӣ аз хизматрасонии саривақтии қитъаҳои баланд, масъалаҳои иҷтимоӣ муҳим ва қитъаҳои садамаовар вобастагии калон дорад. Дар мақола муносибати ба ҳавф нигаронидашуда ба тақсими манбаъҳои нигоҳдории зимистон пешниҳод гардидааст, ки ба баиноватгирӣ аҳамияти нақлиёти роҳ, сатҳи ҳавфи табиӣ-иқлимӣ, вазифаи иҷтимоии қитъа, тақдоршавӣ бастанавӣ ва вазинии оқибатҳои эҳтимолии қатъи шудани ҳаракат асос меёбад. Модели содакардашудаи интегралӣ афзалиятнокунии қитъаҳои пешниҳод шудааст, ки имкон медиҳад минтақаҳои сатҳи хизматрасонии I, II ва III ҷудо карда шаванд. Зарурати истифодаи технологияҳои пешгирикунанда, аз ҷумла коркарди зиддияти рӯйпӯш, мониторинги обу ҳаво ва ҷойгиркунии пешакии техника ва мавод асоснок карда шудааст. Хулоса шудааст, ки муносибати пешниҳодшуда имкон медиҳад самаранокии нигоҳдории зимистона баланд бардошта, ҳавфҳои маҳдудияти нақлиётӣ коҳиш дода шуда, истифодаи оқилонаи захираҳои маҳдуди ташкилотҳои роҳдорӣ таъмин карда мешавад.

Калидвожаҳо: нигоҳдории роҳҳо дар зимистон, роҳҳои автомобилгарди кӯҳӣ, захираҳои маҳдуд, оптимизатсия, нигоҳдории роҳҳо, равиш бар асоси хатар, ҳавфи тарма, дороиҳои роҳ.

OPTIMIZATION OF WINTER MAINTENANCE OF MOUNTAIN HIGHWAYS UNDER LIMITED RESOURCES

Tajik Technical University named after Academician M.S. Osimi, Dushanbe, Tajikistan

The article examines the problem of optimizing winter maintenance of mountain highways under conditions of limited financial, technical, and material resources. The relevance of this issue for mountainous regions is substantiated, as the condition of the road network is simultaneously affected by a complex set of winter natural factors. Special attention is paid to the conditions of the Republic of Tajikistan, where the stability of transport communication largely depends on the timely maintenance of mountain pass sections, socially significant sections, and accident-prone sections. The study proposes a risk-oriented approach to the allocation of winter maintenance resources, based on consideration of the transport significance of the road, the level of natural and climatic risk, the social function of the section, the recurrence of road closures, and the severity of the consequences of possible traffic interruption. A simplified integral model for prioritizing road sections is presented, which makes it possible to identify zones of I, II, and III service levels. The necessity of applying preventive technologies, including anti-icing treatment of the pavement, weather monitoring, and preliminary placement of machinery and materials, is substantiated. It is concluded that the proposed approach makes it possible to increase the efficiency of winter maintenance, reduce the risks of transport isolation, and ensure a more rational use of the limited resources of road organizations.

Keywords: *winter road maintenance, mountain highways, limited resources, optimization, road maintenance, risk-oriented approach, avalanche hazard, road assets.*

Введение

Зимнее содержание автомобильных дорог в горных условиях представляет собой одну из наиболее сложных задач эксплуатационной деятельности дорожной отрасли. В отличие от равнинных участков, здесь на дорожную сеть одновременно воздействует целый комплекс зимних природных факторов (снегозаносы, метелевый перенос снега, гололёд, наледь, снеголавинные процессы, камнепады, локальные оползни и резкие колебания температуры). Эти факторы снижают сцепные качества покрытия, ухудшают видимость, нарушают проезжаемость и повышают вероятность временного закрытия движения [4, 5, 7, 13].

Международные рекомендации PIARC и FHWA подчёркивают, что зимнее содержание должно рассматриваться не только как снегоочистка и распределение противогололёдных материалов, но и как системная функция обеспечения мобильности, безопасности и устойчивости дорожной сети [4, 6, 7, 8]. Это особенно важно для горных стран, где нарушение проезда на одном критическом участке может привести к транспортной изоляции населённых пунктов, задержке экстренных служб, росту транспортных издержек и социально-экономическим потерям [1-3, 19-22].

Актуальность темы особенно высока для Республики Таджикистан. По материалам Всемирного банка, значительная часть территории страны расположена в горной местности, а автомобильные дороги регулярно подвергаются воздействию опасных природных явлений [1, 2, 3]. В проектных документах Всемирного банка отдельно подчёркивается необходимость повышения устойчивости критических дорог и мостов к природным и климатическим угрозам [2].

В этих условиях проблема зимнего содержания выходит за рамки чисто технологической задачи и приобретает экономико-управленческий характер. Эксплуатационные организации часто сталкиваются с ограниченностью бюджетных средств, недостатком специализированной техники, дефицитом противогололёдных материалов и отсутствием возможности одновременно обслуживать все опасные участки сети на одинаковом уровне [10, 11, 15, 16]. Следовательно, возникает задача оптимизации: какие участки обслуживать в первую очередь, какие технологии применять превентивно, как распределять ресурсы между перевалами, участками с высокой интенсивностью движения, лавиноопасными зонами и направлениями, имеющими высокое социально-экономическое значение [6, 7, 8, 10].

Цель статьи - обосновать подход к оптимизации зимнего содержания горных автомобильных дорог при ограниченных ресурсах на основе сочетания риск-ориентированной приоритизации, превентивных технологий и рационального распределения эксплуатационных ресурсов.

Для достижения цели поставлены следующие задачи: определить особенности зимнего содержания горных автомобильных дорог; выявить факторы, влияющие на приоритетность зимних мероприятий; предложить структуру многофакторной оценки участков дороги; обосновать организационно-технологические решения для условий ограниченных ресурсов.

Материалы и методы. Методическую основу исследования составили международные материалы PIARC по зимнему содержанию, руководство FHWA по противогололёдной обработке дороги, документы FHWA по дорожному погодному менеджменту и показателям его эффективности, а также публикации TRB и AASHTO по экономической эффективности зимних работ и применению противогололёдных технологий [4-11]. Для учёта региональной специфики использованы материалы Всемирного банка по устойчивости дорог Таджикистана к стихийным и климатическим воздействиям, а также отечественные работы по содержанию и ремонту дорог в горных условиях [1-3, 15-18].

В работе применялись методы инженерно-технологического анализа, сравнительной оценки зимних воздействий, экспертной приоритизации и обобщения практик управления зимним содержанием. В качестве основной концепции использован подход, при котором эффективность зимнего содержания определяется не абсолютным объёмом выполненных работ, а достижением требуемого результата на наиболее критичных участках сети при заданном ограничении ресурсов [7, 8, 10, 16].

Особенности зимнего содержания горных автомобильных дорог

Для горных дорог зимний период характеризуется высокой пространственной неоднородностью дорожных условий. На коротком протяжении могут существенно меняться высота над уровнем моря, температура воздуха и покрытия, интенсивность ветра, высота снежного покрова и степень опасности лавин, наледи или камнепадов. Это исключает возможность полностью унифицированного обслуживания всей сети и требует дифференцированного подхода по типам участков [4, 5, 13, 15].

Современная практика зимнего содержания включает не только корректирующие действия после ухудшения состояния проезжей части, но и превентивные мероприятия, основанные на мониторинге погодных условий, прогнозировании ледообразования и своевременной обработке покрытия [4, 6, 7].

В горной местности критическое значение имеют следующие факторы:

- перевальные участки и зоны метелевого переноса снега;
- затенённые участки, где дольше сохраняется лёд;
- зоны выхода грунтовых вод с образованием наледи;
- участки с повышенной лавинной опасностью;
- отрезки дорог у неустойчивых склонов, где зимой и ранней весной возрастает риск обвалов и камнепадов;
- направления, обеспечивающие связь с районными центрами, объектами жизнеобеспечения и международными транспортными коридорами [1, 2, 12, 13, 15].

С экономической точки зрения зимнее содержание даёт не только эксплуатационный, но и общественный эффект. Исследования TRB показывают, что зимние работы обеспечивают прямые выгоды пользователям за счёт сокращения задержек, повышения безопасности и поддержания проезжаемости [10]. Следовательно, при дефиците бюджета важно учитывать не только стоимость самих мероприятий, но и последствия их невыполнения.

Факторы оптимизации зимнего содержания при ограниченных ресурсах

Оптимизация зимнего содержания должна исходить из того, что эксплуатационные ресурсы почти всегда ограничены. К числу ключевых ограничений относятся недостаточный объём финансирования, дефицит снегоочистительной и распределительной техники, ограниченность складских запасов материалов, недостаток персонала и сложность доставки ресурсов на высокогорные участки в период неблагоприятной погоды [6, 7, 10, 15].

Таблица 1 - Факторы, влияющие на приоритет зимнего содержания горных дорог
Table 1 – Factors influencing the priority of winter maintenance of mountain roads

Фактор	Содержание фактора	Влияние на приоритет
Транспортная значимость участка	Связь районов, международные и межрегиональные маршруты	Чем выше значимость, тем выше приоритет
Интенсивность и состав движения	Количество ТС, доля грузового транспорта, автобусов	Рост интенсивности повышает приоритет
Уровень зимней опасности	Гололёд, заносы, наледь, лавины, камнепады	Чем выше риск, тем выше приоритет
Социальная значимость	Доступ к больницам, школам, центрам управления, рынкам	Повышает приоритет даже при средней интенсивности
Повторяемость закрытий	Частота перекрытий дорог и задержек в предыдущие зимы	Высокая повторяемость повышает приоритет
Доступность техники	Возможность быстро направить технику на участок	Низкая доступность требует превентивного подхода
Стоимость содержания единицы длины участка	Расход материалов, топлива, времени, техники	Учитывается при выборе технологии
Потенциальный ущерб (последствия) от несвоевременного обслуживания	ДТП, изоляция населённых пунктов, рост потерь времени	Чем тяжелее последствия, тем выше приоритет

В международной практике именно поэтому широко применяются системы приоритетов обслуживания и инструменты поддержки принятия решений, позволяющие заранее определять очередность обработки участков и тип технологического реагирования [7, 8, 9, 11]. При выборе приоритетов целесообразно учитывать не один показатель, а совокупность транспортных, природно-климатических, социальных и экономических факторов. Для наглядного представления основных факторов предлагается таблица 1.

Данные таблицы 1 показывают, что при ограниченных ресурсах не все участки дороги должны обслуживаться по одной и той же схеме. Более рациональным является распределение сети по уровням обслуживания: участки высшего приоритета, среднего приоритета и локального значения [7, 8, 11]. Такой подход согласуется с международной практикой зимнего содержания, где используются уровни сервиса и целевые показатели состояния покрытия после осадков или ледообразования [4, 5, 7].

Риск-ориентированная модель приоритизации зимних работ

В условиях ограниченных ресурсов зимнее содержание горных автомобильных дорог не может осуществляться по принципу равномерного распределения техники, материалов и эксплуатационных мероприятий по всей сети. Более рациональным является подход, основанный на ранжировании участков по степени их эксплуатационной значимости и уровню зимнего риска [6, 7, 8, 16].

Необходимость такой приоритизации особенно актуальна для горных дорог, где даже кратковременное прекращение движения на отдельных участках может привести к нарушению связи между населёнными пунктами, задержке экстренных служб, росту транспортных затрат и ограничению доступа к объектам социальной инфраструктуры [1, 2, 3]. Кроме того, зимние явления в горах отличаются высокой пространственной изменчивостью: на одной дороге могут чередоваться участки с различными опасными природными явлениями [12, 13, 15].

Для практического применения предлагается использовать упрощённую интегральную модель оценки приоритета зимнего содержания:

$$P_i = w_1 T_i + w_2 R_i + w_3 S_i + w_4 A_i + w_5 C_i, \quad (1)$$

где: P_i - итоговый приоритет i -го участка;

T_i - транспортная значимость и интенсивность движения;

R_i - уровень природно-климатического зимнего риска;

S_i - социальная значимость участка;

A_i - аварийность и повторяемость закрытий;

C_i - коэффициент последствий отказа;

$w_1 \dots w_5$ - весовые коэффициенты, устанавливаемые в зависимости от целей эксплуатации, специфики сети и доступности исходных данных.

Таблица 2 – Пример расчета интегрального приоритета участков зимнего содержания

Table 2 – Example of calculating the integrated priority of winter maintenance sections

Участок	T_i транспортная значимость	R_i зимний риск	S_i социальная значимость	A_i аварийность и закрытия	C_i последствия отказа	P_i итоговый балл	Приоритет
Участок 1 - перевал на международном направлении	5	5	4	4	5	23	I
Участок 2 - подъезд к районному центру	4	4	5	3	4	20	I
Участок 3 - межпоселковый участок локального значения	2	3	3	2	2	12	III

Предложенная модель исходит из того, что приоритет зимнего обслуживания должен быть тем выше, чем больше транспортная роль дороги, интенсивнее зимние опасные явления, значимее

социальная функция направления и тяжелее последствия возможного нарушения проезда [7, 8, 10, 16]. В отличие от упрощённого подхода, при котором ресурсы распределяются преимущественно по категории дороги или протяжённости участка, данная модель позволяет учитывать фактическую эксплуатационную важность каждого отрезка в зимний период.

Для демонстрации практического применения модели рассмотрим условный пример оценки трёх участков горной автомобильной дороги (см. Таблицу 2). Все факторы оцениваются по пятибалльной шкале, где 1 соответствует низкому уровню показателя, а 5 - наиболее высокому. Для упрощения примера весовые коэффициенты приняты одинаковыми, то есть: $w_1 = w_2 = w_3 = w_4 = w_5 = 1$.

Как показывает таблица 2, наибольший приоритет зимнего содержания получает участок 1, поскольку он сочетает высокую транспортную значимость, высокий уровень зимнего риска и тяжёлые последствия возможного прекращения движения. Участок 2 также должен обслуживаться в первоочередном порядке, так как обеспечивает доступ к районному центру и имеет высокую социальную значимость. Участок 3, несмотря на наличие зимних рисков, при ограниченных ресурсах может относиться к более низкой категории приоритета, поскольку его транспортная роль и последствия временного прекращения проезда менее значительны.

Практическое значение предложенной модели заключается в том, что она позволяет перейти от интуитивного распределения ресурсов к более формализованной и обоснованной схеме принятия решений [7, 8, 16]. Даже при экспертной оценке факторов становится возможным выделить участки I, II и III приоритета и установить для них различный уровень обслуживания, различную частоту патрулирования, различный порядок выезда техники и различный режим использования противогололёдных материалов.

Для наглядного представления логики управленческого процесса целесообразно использовать рисунок 1. Он показывает, что оптимизация зимнего содержания не сводится к разовому распределению ресурсов, а представляет собой повторяющийся управленческий цикл.



Рисунок 1 - Схема оптимизации зимнего содержания горных автодорог при ограниченных ресурсах

Figure 1 – Scheme for optimizing the winter maintenance of mountain highways under limited resources

Как показано на рисунке 1, оптимизация зимнего содержания включает последовательный цикл взаимосвязанных действий: мониторинг погодных условий и состояния покрытия, выявление опасных участков, оценку факторов приоритета, ранжирование участков, выбор технологии воздействия, распределение ресурсов, контроль результатов и последующую корректировку плана работ [7, 8, 9]. Такой цикл особенно важен для горных дорог, где изменение погодных условий и дорожной обстановки может происходить в короткие промежутки времени.

Дополнительное представление о дифференциации участков по степени приоритета даёт таблица 3.

Таблица 3 может быть использована эксплуатационными организациями при разработке зимних программ содержания. Она позволяет увязать технические, социальные и риск-ориентированные параметры в единую управленческую схему [7, 8, 16].

Анализ таблиц 2 и 3 показывает, что высший приоритет зимнего содержания получают не только участки с наиболее высокой интенсивностью движения, но прежде всего те отрезки, на которых совмещаются высокий уровень зимнего риска, значимая транспортная функция и существенные последствия возможного прекращения движения. Это особенно характерно для перевальных участков, подъездов к районным центрам и направлений, обеспечивающих доступ к социально значимым объектам и межрегиональным связям [1, 2, 15, 16].

Таблица 3 - Пример ранжирования участков горной дороги по приоритету зимнего содержания
Table 3 – Example of ranking mountain road sections according to the priority of winter maintenance

Участок	Интенсивность движения	Зимний риск	Социальная значимость	Последствия отказа	Итоговый приоритет
Участок А - перевальный	Высокая	Очень высокая	Высокая	Очень высокая	I
Участок Б - подход к районному центру	Средняя	Высокая	Очень высокая	Высокая	I
Участок В - локального значения	Низкая	Средняя	Средняя	Средняя	III
Участок Г - межпоселковый	Средняя	Средняя	Высокая	Средняя	II
Участок Д - у лавинно-опасного склона	Средняя	Очень высокая	Средняя	Высокая	I

Организационно-технологические решения для условий ограниченных ресурсов

При ограниченных ресурсах особое значение приобретают не только объёмы работ, но и выбор момента их выполнения. В руководстве FHWA по противогололёдной обработке дороги подчёркивается, что превентивная обработка покрытия до образования прочной ледяной связи может быть эффективнее и экономичнее, чем последующее устранение уже сформировавшегося снежно-ледяного слоя [6]. Аналогично, своевременный выезд техники на основе погодного прогноза и данных о состоянии покрытия позволяет сократить расход материалов и время восстановления допустимого уровня сервиса [7, 8, 9].

Для горных дорог рациональный набор организационно-технологических решений включает:

- выделение участков I, II и III приоритета;
- обязательное дежурство техники и материалов на перевалах и у критических узлов;
- применение противогололёдных материалов на участках с высокой повторяемостью гололёда;
- превентивную очистку участков метелевого переноса;
- создание резервов материалов в удалённых районах до начала зимы;
- использование погодного мониторинга и данных дорожных датчиков;
- перераспределение техники не по административному принципу, а по фактическому риску и значимости направления [6, 7, 8, 11, 15].

С точки зрения экономики особенно важно снижение потерь от закрытия дорог. Для горной страны прерывание сообщения означает не только неудобства для пользователей, но и срыв поставок, задержку экстренных служб, рост транспортных издержек и изоляцию населённых пунктов [1, 2, 3]. Поэтому в расчётах эффективности зимнего содержания следует учитывать не только стоимость работ, но и предотвращённый ущерб.

Результаты исследований TRB, а также материалы по дорожному погодному менеджменту показывают, что информационно-поддерживаемые превентивные решения способны снижать суммарные эксплуатационные издержки и потери пользователей [7, 8, 10].

Научная новизна исследования

Научная новизна данного исследования заключается в разработке и обосновании подхода к оптимизации зимнего содержания горных автомобильных дорог в условиях ограниченных ресурсов на основе совмещения риск-ориентированного, эксплуатационного и организационно-технологического подходов [7, 8, 15, 16].

К основным элементам научной новизны относятся следующие положения:

1. Систематизированы факторы приоритизации зимнего содержания горных автомобильных дорог, включающие не только транспортную значимость участка и интенсивность движения, но и уровень природно-климатического зимнего риска, социальную функцию дороги, аварийность, повторяемость закрытий и последствия возможного прекращения движения [1, 2, 7, 13].

2. Предложена упрощённая интегральная модель ранжирования участков зимнего содержания, позволяющая в условиях ограниченного финансирования, дефицита техники и

материалов обосновывать очередность эксплуатационных мероприятий на основе совокупной оценки транспортных, климатических, социальных и эксплуатационных параметров [7, 8, 16].

3. Обоснован риск-ориентированный принцип распределения ресурсов зимнего содержания для горных автомобильных дорог, согласно которому приоритет получают не все участки сети равномерно, а направления с наибольшим сочетанием зимней опасности, транспортной значимости и тяжести последствий отказа [6, 7, 10].

4. Разработана схема оптимизации зимнего содержания горных дорог, объединяющая мониторинг погодных условий и состояния покрытия, выявление опасных участков, их ранжирование, выбор технологии воздействия, распределение ресурсов и последующую корректировку плана работ в едином управленческом цикле [7, 8, 9].

5. Показана возможность практической адаптации предложенного подхода к условиям Республики Таджикистан, где зимнее содержание осуществляется в сложной горной среде и при объективно ограниченных эксплуатационных ресурсах [1, 2, 15, 16].

Значение предложенного подхода для Таджикистана

Для Республики Таджикистан применение оптимизационного подхода к зимнему содержанию особенно важно по трём причинам. Во-первых, сама конфигурация дорожной сети в горах означает высокую зависимость доступности территорий от состояния ограниченного числа критических направлений [1, 2]. Во-вторых, природные угрозы имеют комплексный характер: снег и лёд часто сочетаются с лавинами, камнепадами, оползнями и последующими весенними размывами [1, 2, 13]. В-третьих, ресурсы содержания объективно ограничены, поэтому равномерное обслуживание всей сети без приоритизации приводит к распылению средств и снижению результата [15, 16].

В этом контексте наиболее перспективным является включение зимнего содержания в более широкую систему управления дорожными активами. Тогда решения о распределении техники, запасов материалов и уровня сервиса можно принимать не только по факту снегопада, но и на основе исторических данных, риска закрытия, социально-экономической значимости и фактического технического состояния дороги [7, 8, 16].

Для условий Таджикистана это означает необходимость перехода от преимущественно реагирующей схемы зимнего содержания к превентивной и риск-ориентированной модели. Такая модель позволяет заранее выделять критические участки, размещать ресурсы ближе к зонам риска, использовать погодную информацию, снижать вероятность закрытия дорог и повышать устойчивость транспортного сообщения в горных районах [1, 2, 6, 7, 15].

Заключение

1. Установлено, что зимнее содержание горных автомобильных дорог представляет собой многофакторную задачу, в которой одновременно учитываются опасные природные явления, транспортная значимость дорог и ограниченность эксплуатационных ресурсов [4, 5, 13, 15].

2. Показано, что при ограниченных ресурсах эффективной является не равномерная, а приоритетная схема содержания, основанная на ранжировании участков по транспортной роли, уровню риска, социальной значимости и последствиям отказа [6, 7, 8, 16].

3. Обосновано, что применение превентивных технологий, включая противогололёдную обработка дороги и использование дорожной погодной информации, позволяет снижать расход ресурсов и ускорять восстановление требуемого уровня дорожного сервиса [6, 7, 8, 9].

4. Предложена упрощённая риск-ориентированная модель приоритизации участков зимнего содержания, а также формы её практической реализации в виде таблиц ранжирования и схемы управленческого цикла [7, 8, 16].

5. Для Таджикистана оптимизация зимнего содержания горных дорог должна рассматриваться как важный элемент повышения устойчивости транспортной системы и как составная часть системы управления дорожными активами [1, 2, 15, 16].

Рецензент: Сайраҳмонов Р.Х. - к.т.н., доцент, заведующий кафедрой "Строительство дорог, сооружений и транспортных коммуникаций" ТПУ им. ақад. М.С. Осими.

Литература

1. Resilient roads: Protecting critical lifelines in mountainous Tajikistan // World Bank Blogs. – 2021. – URL: <https://blogs.worldbank.org> (дата обращения: 18.05.2026).
2. Tajikistan Preparedness and Resilience to Disasters Project (P177779). Project Appraisal Document. Washington, D.C.: World Bank, 2022.
3. Assessment of Economic Impacts from Disasters Along Key Corridors. Washington, D.C.: World Bank, 2021.
4. Winter maintenance // PIARC Road Tunnels Manual. Paris: World Road Association (PIARC).
5. Snow and Ice Databook 2026 // PIARC Virtual Library. Paris: World Road Association (PIARC), 2026.
6. Manual of Practice for an Effective Anti-Icing Program: A Guide for Highway Winter Maintenance Personnel. FHWA-RD-95-202. Washington, D.C.: Federal Highway Administration, 1996.
7. Road Weather Management Program Publications. Washington, D.C.: Federal Highway Administration.
8. Road Weather Management Performance Measures. FHWA-HOP-22-002. Washington, D.C.: Federal Highway Administration, 2022.
9. Best Practices for Road Weather Management. Washington, D.C.: U.S. Department of Transportation, 2003.
10. Economic Impact of Winter Road Maintenance // Transportation Research Record. Transportation Research Board, 1994.
11. Update of the AASHTO Guide for Snow and Ice Control. Washington, D.C.: AASHTO / NCHRP, 2008.
12. Unstable Slope Management Program for Federal Land Management Agencies: Field Manual. Washington, D.C.: Federal Highway Administration.
13. Natural Hazards in Tajikistan. Dushanbe: OSCE Programme Office in Dushanbe.
14. PIARC Strategic Plan 2024-2027. Paris: World Road Association (PIARC), 2024.
15. Каримов Б.Б. Содержание и ремонт дорог в горных условиях: учебное пособие для студентов / Б.Б. Каримов, Ж.К. Калилов, С.Б. Мирзоев. - Москва: Интрансдорнаука, - Можайск: МПМК, 2016. - 320 с. УДК 625.711.812:625.76, ББК 39.311.97-082 K231, ISBN 978-5-901848-22-7
16. Мирзозода С.Б. Система управления дорожными активами (СУДА): монография / С.Б. Мирзозода, О.А. Красиков, Б.Б. Каримов. - Душанбе: Ирфон, 2023. - 264 с. УДК 625.7/8(075.8), ББК 39.311я73, К78
17. Мирзоев С.Б. Рекомендательные мероприятия по повышению качества строительства и ремонта автомобильных дорог в Республике Таджикистан / А.М. Оев, С.А. Оев, С.Б. Мирзоев // Вестник Таджикского технического университета. - Душанбе: ТТУ, - 2010. - № 1(9)2010. - С.72-76.
18. Мирзоев С.Б. Содержание покрытий автомобильных дорог в условиях Таджикистана / С.Б. Мирзоев, А.М. Оев // Вестник Кыргызского государственного университета строительства, транспорта и архитектуры. - 2008. - № 2. - С. 127-130.
19. Давлатшоев, Р. А. Оценка эффективности запасных тормозных систем различных компоновок при эксплуатации автомобилей в горных условиях Р.А. Давлатшоев, Б.Ж. Мажитов / Р. А. Давлатшоев, Б. Ж. Мажитов // Светоч науки. – 2025. – № 4. – С. 73-79. – EDN WOAUTU.
20. Мирзозода, С. Б. Цифровизация дорожной отрасли Таджикистана / С. Б. Мирзозода // Светоч науки. – 2025. – № 4. – С. 79-86. – EDN AIJCGH.
21. Мажитов, Б. Ж. Тахлили таъсири ҳолати техникии ВНА ба беҳатари ҳаракат дар роҳ / Б. Ж. Мажитов, Р. А. Давлатшоев, Н. М. Каримов // Фурӯғи илм. – 2025. – №. 4. – Р. 86-91. – EDN JWAAGQ.
22. Пиров, Ж. Т. Влияние распределения транспортных потоков на скорость сообщения на трехполосных сегментах улично-дорожных сетей / Ж. Т. Пиров, Ш. А. Бозоров, Д. Д. Мухторов // Политехнический вестник. Серия: Инженерные исследования. – 2023. – № 1(61). – С. 148-152. – EDN DXNUVP.

References

1. Resilient Roads: Protecting Critical Lifelines in Mountainous Tajikistan // World Bank Blogs. – 2021. – URL: <https://blogs.worldbank.org> (accessed: May 18, 2026).
2. Tajikistan Preparedness and Resilience to Disasters Project (P177779). Project Appraisal Document. – Washington, D.C.: World Bank, 2022.
3. Assessment of Economic Impacts from Disasters Along Key Corridors. – Washington, D.C.: World Bank, 2021.
4. Winter Maintenance // PIARC Road Tunnels Manual. – Paris: World Road Association (PIARC).
5. Snow and Ice Databook 2026 // PIARC Virtual Library. – Paris: World Road Association (PIARC), 2026.
6. Manual of Practice for an Effective Anti-Icing Program: A Guide for Highway Winter Maintenance Personnel. FHWA-RD-95-202. – Washington, D.C.: Federal Highway Administration, 1996.
7. Road Weather Management Program Publications. – Washington, D.C.: Federal Highway Administration.
8. Road Weather Management Performance Measures. FHWA-HOP-22-002. – Washington, D.C.: Federal Highway Administration, 2022.

9. Best Practices for Road Weather Management. – Washington, D.C.: U.S. Department of Transportation, 2003.
10. Economic Impact of Winter Road Maintenance // Transportation Research Record. – Transportation Research Board, 1994.
11. Update of the AASHTO Guide for Snow and Ice Control. – Washington, D.C.: AASHTO / NCHRP, 2008.
12. Unstable Slope Management Program for Federal Land Management Agencies: Field Manual. – Washington, D.C.: Federal Highway Administration.
13. Natural Hazards in Tajikistan. – Dushanbe: OSCE Programme Office in Dushanbe.
14. PIARC Strategic Plan 2024–2027. – Paris: World Road Association (PIARC), 2024.
15. Karimov, B.B. Maintenance and Repair of Roads in Mountain Conditions: Textbook for Students / B.B. Karimov, Zh.K. Kalilov, S.B. Mirzoev. – Moscow: Intransdornauka; Mozhaisk: MPK, 2016. – 320 p. UDC 625.711.812:625.76; BBK 39.311.97-082 K231; ISBN 978-5-901848-22-7.
16. Mirzozoda, S.B. Road Asset Management System (RAMS): Monograph / S.B. Mirzozoda, O.A. Krasikov, B.B. Karimov. – Dushanbe: Irfon, 2023. – 264 p. UDC 625.7/8(075.8); BBK 39.311я73, K78.
17. Mirzoev, S.B. Recommended Measures for Improving the Quality of Construction and Repair of Automobile Roads in the Republic of Tajikistan / A.M. Oev, S.A. Oev, S.B. Mirzoev // Bulletin of Tajik Technical University. – Dushanbe: TTU, 2010. – No. 1(9). – P. 72–76.
18. Mirzoev, S.B. Maintenance of Road Pavements under the Conditions of Tajikistan / S.B. Mirzoev, A.M. Oev // Bulletin of Kyrgyz State University of Construction, Transport and Architecture. – 2008. – No. 2. – P. 127–130.
19. Davlatshoev, R.A. Evaluation of the Efficiency of Reserve Braking Systems of Various Configurations during Vehicle Operation in Mountain Conditions / R.A. Davlatshoev, B.Zh. Mazhitov // Svetoch Nauki. – 2025. – No. 4. – P. 73–79.
20. Mirzozoda, S.B. Digitalization of the Road Industry of Tajikistan / S.B. Mirzozoda // Svetoch Nauki. – 2025. – No. 4. – P. 79–86.
21. Mazhitov, B.Zh. Analysis of the Impact of the Technical Condition of Vehicles on Road Traffic Safety / B.Zh. Mazhitov, R.A. Davlatshoev, N.M. Karimov // Furughi Ilm. – 2025. – No. 4. – P. 86–91.
22. Pirov, Zh.T. Influence of Traffic Flow Distribution on Travel Speed in Three-Lane Segments of Urban Road Networks / Zh.T. Pirov, Sh.A. Bozorov, D.D. Mukhtorov // Polytechnic Bulletin. Series: Engineering Research. – 2023. – No. 1(61). – P. 148–152.

**МАЪЛУМОТ ДАР БОРАИ МУАЛЛИФ - СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРЕ -
INFORMATION ABOUT AUTHOR**

TJ	RU	EN
Мирзозода Сухроб Бегмат	Мирзозода Сухроб Бегмат	Mirzozoda Suhrob Begmat
номзади илмҳои техники, и.в. дотсент	кандидат технических наук, и.о. доцента	candidate of technical sciences, acting assistant professor
Донишгоҳи Техникии Тоҷикистон ба номи академик М.С. Осимӣ	Таджикский технический университет имени академика М.С. Осими	Tajik Technical University named after academician M.S. Osimi
E-mail: sukhrob63@mail.ru		
ORCID 0000-0002-9817-3633		

МЕТОД ОЦЕНКИ ЭФФЕКТИВНОСТИ ГРУЗОВЫХ АВТОМОБИЛЕЙ

¹С.С. Сайдуллозода, ¹Б.Ж. Мажитов, ²К.Т. Мамбеталин

¹Таджикский технический университет имени академика М.С. Осими, г. Душанбе, Республика Таджикистан

²Кокшетауский университет имени Ш. Уалиханова, Кокшетау, Казахстан

В статье рассматриваются вопросы оценки эффективности эксплуатации автомобильного транспорта на основе удельных энергетических показателей. Предложен метод сравнительной оценки автомобилей различных классов и типов с различными типами двигателей по удельным энергетическим затратам транспортного процесса. В качестве критериев оценки использованы энергетический эквивалент расходуемого топлива, удельная энергия самопередвижения автомобиля и коэффициент энергетической эффективности. Разработана система удельных показателей, выраженных в МДж/(т·км), позволяющая сопоставлять автомобили независимо от их массы и конструктивных особенностей. Выполнен сравнительный анализ грузовых автомобилей отечественного и зарубежного производства с карбюраторными и дизельными двигателями. Установлено, что удельная энергия самопередвижения автомобилей имеет близкие значения для различных типов подвижного состава, тогда как автомобили с дизельными двигателями и большой грузоподъемностью характеризуются меньшими удельными энергетическими затратами и более высокой энергетической эффективностью. Предложенный подход может быть использован при выборе подвижного состава и оценке энергоэффективности грузовых перевозок.

Ключевые слова: автомобильный транспорт, энергоэффективность, энергетический эквивалент топлива, удельная энергоёмкость, транспортный процесс, энергетические затраты, грузовые автомобили, эксплуатационная эффективность.

УСУЛИ АРЗЁБИИ САМАРАНОКИИ АВТОМОБИЛҲОИ БОРКАШ

¹С.С. Сайдуллозода, ¹Б.Ж. Мажитов, ²К.Т. Мамбеталин

¹Донишгоҳи техникии Тоҷикистон ба номи академик М.С. Осимӣ, ш. Душанбе, Ҷумҳурии Тоҷикистон

²Донишгоҳи Кокшетау ба номи Ш. Уалиханов, шаҳри Кокшетау, Қазоқистон

Дар мақола масъалаҳои арзёбии самаранокии истифодаи нақлиёти автомобилӣ дар асоси нишондиҳандаҳои ҳоси энергетикӣ баррасӣ карда мешаванд. Усули муқоисавии арзёбии автомобилҳои синфҳо ва намудҳои гуногун бо муҳаррикҳои гуногун аз рӯи ҳароҷоти ҳоси энергетикӣ раванди ҳамлу нақл пешниҳод шудааст. Ҳамчун меъёрҳои арзёбӣ эквиваленти энергетикӣ сӯзишвории сарфшаванда, энергияи ҳоси худҳаракаткунии автомобил ва коэффисиенти самаранокии энергетикӣ истифода шудаанд. Низомии нишондиҳандаҳои ҳос таҳия гардидааст, ки бо воҳиди МҶ/(т·км) ифода шуда, имкон медиҳад автомобилҳо новобаста аз масса ва хусусиятҳои конструксионии онҳо муқоиса карда шаванд. Таҳлили муқоисавии автомобилҳои боркаши истеҳсоли ватанӣ ва хориҷӣ бо муҳаррикҳои карбюратордор ва дизелӣ гузаронида шудааст. Муайян карда шуд, ки энергияи ҳоси худҳаракаткунии автомобилҳо барои намудҳои гуногуни воситаҳои ҳаракаткунанда қиматҳои ба ҳам наздик доранд, дар ҳоле ки автомобилҳои дорои муҳаррикҳои дизелӣ ва иқтидори калони борбардорӣ бо ҳароҷоти камтари ҳоси энергетикӣ ва самаранокии баланди энергетикӣ тавсиф мешаванд. Усули пешниҳодшуда метавонад ҳангоми интиҳоби воситаҳои ҳаракаткунанда ва арзёбии самаранокии энергетикӣ ҳамлу нақли бор истифода шавад.

Калидвожаҳо: нақлиёти автомобилӣ, самаранокии энергетикӣ, эквиваленти энергетикӣ сӯзишворӣ, энергиягунҷошии ҳос, раванди ҳамлу нақл, ҳароҷоти энергетикӣ, автомобилҳои боркаш, самаранокии истифодабарӣ.

METHOD OF ASSESSING THE EFFICIENCY OF TRUCKS

¹S.S. Saidullozoda, ¹B.Zh. Mazhitov, ²K.T. Mambetalin

¹Tajik Technical University named after Academician M.S. Osimi, Dushanbe, Republic of Tajikistan

²Kokshetau University named after Sh. Ualikhanov, Kokshetau, Kazakhstan

The article considers the issues of evaluating the efficiency of road transport operation based on specific energy indicators. A method for comparative assessment of vehicles of different classes and types with various engine types based on the specific energy consumption of the transportation process is proposed. The evaluation criteria include the energy equivalent of consumed fuel, the specific energy of vehicle self-propulsion, and the coefficient of energy efficiency. A system of specific indicators expressed in MJ/(t·km) has been developed, which makes it possible to compare vehicles regardless of their weight and design features. A comparative analysis of domestically and foreign-produced trucks equipped with carburetor and diesel engines has been carried out. It has been established that the specific energy of vehicle self-propulsion has similar values for different types of rolling stock, whereas vehicles with diesel engines and high load capacity are characterized by lower specific energy consumption and higher energy efficiency. The proposed approach can be used for selecting rolling stock and evaluating the energy efficiency of freight transportation.

Keywords: road transport, energy efficiency, fuel energy equivalent, specific energy intensity, transportation process, energy costs, freight vehicles, operational efficiency.

Введение

Автомобильный транспорт является важнейшим элементом транспортной инфраструктуры государства и обеспечивает значительную часть грузовых и пассажирских перевозок. Развитие промышленности, торговли и логистических систем сопровождается постоянным ростом объемов автомобильных перевозок, что приводит к увеличению эксплуатационных затрат и потребления топливно-энергетических ресурсов. При этом сегодня рост экономики и, как следствие, благосостояния общества в целом и отдельных его граждан приводит к увеличению потребностей в перевозках и в первую очередь в автомобильных перевозках.

При развитии рыночных отношений на всех этапах развития экономики автомобильный транспорт обеспечивает потребности ее отраслей и населения и является ключевым элементом экономики всех развитых стран мира. При этом следует отметить, что роль автомобильного транспорта не только сводится к перемещению грузов и пассажиров, он активно воздействует на весь процесс расширенного производства, на формирование и потребление запасов продукции на производстве и в сфере потребления, на складское хозяйство, в обеспечении развития связи и координации работы всех отраслей экономики. Грузовые автомобили составляют основу транспортной инфраструктуры, обеспечивая гибкую доставку грузов и в основном эффективно используются для перевозки небольших объемов грузов на короткие расстояния, что это в первую очередь связано с его малой грузоподъемностью и сравнительно высокой себестоимостью. В странах, где мало развита транспортная система, доля транспортных затрат в себестоимости продукции относительно высока и составляет 15...20 % и более против 7...8 % в странах с развитой транспортной системой и рыночной экономикой.

В логистической системе большинства стран мира роль грузового транспорта является определяющей, а эффективность его эксплуатации напрямую зависит от баланса между затратами и производительностью.

В современных условиях одним из основных направлений повышения эффективности эксплуатации автотранспортных средств является снижение удельных энергетических затрат транспортного процесса. Рациональный выбор подвижного состава позволяет сократить расход топлива, уменьшить себестоимость перевозок и повысить конкурентоспособность транспортных предприятий.

Традиционно оценка эффективности автомобилей осуществляется по показателям грузоподъемности, производительности, средней эксплуатационной скорости, расхода топлива и себестоимости перевозок. Однако данные показатели не позволяют в полной мере сопоставлять автомобили различных классов и конструктивных схем.

В настоящее время все большее распространение получают энергетические методы оценки транспортных средств, основанные на анализе затрат энергии топлива при выполнении транспортной работы. Использование энергетических показателей позволяет привести различные характеристики автомобилей к единой сопоставимой системе оценки.

Анализ известных исследований [1-7, 13-16] показывает, что существующие методы оценки топливно-энергетической эффективности автомобилей не обеспечивают универсального критерия сравнительной оценки различных типов подвижного состава. В связи с этим задача разработки энергетических критериев оценки эффективности эксплуатации автомобилей остается актуальной.

Целью настоящего исследования является разработка и апробация метода оценки эффективности эксплуатации автомобилей на основе энергетических характеристик топлива и удельных энергетических затрат при самопередвижении автомобиля.

Научная новизна работы заключается:

- в использовании энергетического эквивалента топлива в качестве единого критерия сравнительной оценки автомобилей;
- в разработке показателя удельной энергоемкости самопередвижения автомобиля;
- в сравнительной оценке эффективности автомобилей различных классов и типов двигателей на основе энергетических показателей.

Исследовательская часть

Методика оценки эффективности автомобилей

Первоначальной оценкой грузового автомобиля в условиях становления и подъема промышленности и всего народного хозяйства в 20...30-е годы прошлого столетия было количество груза, которое мог взять на борт автомобиль, т.е. его грузоподъемность. Этот груз должен был быть доставлен в пункт назначения в кратчайшие сроки, автомобиль стал оцениваться по средней эксплуатационной скорости движения.

По мере роста объема автомобильных перевозок стремление их выполнить любой ценой стало уступать требованию выполнить с меньшими затратами, стали считать транспортные расходы, т.е. появилась экономическая оценка автомобилей.

В настоящее время в связи с сокращением мировых природных энергетических ресурсов, в рыночных условиях стали считать затраты энергии или топливную экономичность автомобилей. Стала потребностью энергетическая оценка транспортных средств.

Для оценки эффективности эксплуатации автомобилей использованы следующие показатели:

- энергетический эквивалент расходуемого топлива;
- энергия, затрачиваемая на преодоление сопротивления движению;
- коэффициент энергетической эффективности;
- удельная энергоёмкость транспортного процесса.

Эксплуатационные расходы автомобильного транспорта определяются выражением [1]:

$$C_э = C_m + C_{\text{м}} + C_{\text{оп}} + C_{\text{ш}} + C_з + C_n + C_a + C_d + C_{\text{н-р}}, \quad (1)$$

где C_m – затраты на топливо; $C_{\text{м}}$ – затраты на эксплуатационные материалы; $C_{\text{оп}}$ – затраты на текущее обслуживание и текущий ремонт; $C_{\text{ш}}$ – затраты на шины; $C_з$ – заработная плата водителей; C_n – накладные расходы; C_a – амортизация транспортного средства и отчисления на капитальный ремонт; C_d – дорожная составляющая; $C_{\text{н-р}}$ – затраты на погрузочно-разгрузочные работы.

Единицами измерения этих показателей могут быть абсолютные величины, сомони или относительные сомони/ткм, т.е. удельные величины.

Численное определение составляющих уравнения (1) потребует привлечения многих других величин, отражающих конструкцию автомобиля и ход транспортного процесса, что показывает сложность задачи определения оценки эффективности автомобилей.

Одним из основных компонентов эксплуатационных затрат являются затраты на топливо, определяющие энергетическую эффективность транспортного процесса.

Энергетическая оценка автомобилей производится в настоящее время через топливную экономичность, мощность двигателя, мощность на транспортный процесс и при помощи коэффициента, являющегося отношением полезной и всей затраченной энергии. Подробный анализ известных и предложенных комплексных показателей топливно-энергетической эффективности автомобилей произведен в [2-7]. Этот анализ показывает, что поиск оптимальной оценки конструктивного и эксплуатационного совершенства автомобилей не завершен.

Оценка эффективности автомобиля по энергетическому эквиваленту топлива

При оценке автомобилей, у которых большое разнообразие по конструкции, по техническим и эксплуатационным характеристикам, по назначению и областям применения, по видам перевозимых грузов и т.д. необходимо иметь общий знаменатель, по которому можно будет судить об эффективности автомобилей. По нашему мнению, таким общим знаменателем являются приведенные выше энергетические характеристики топлива.

Энергетический эквивалент топлива определяется количеством энергии, содержащейся в топливе, расходуемом автомобилем на прохождение 1 км пути.

Энергетический эквивалент расходуемого топлива определяется выражением:

$$\text{ЭН}_{\text{ЭКВ}} = \frac{Q \cdot H_u}{100}, \text{ МДж/км}, \quad (2)$$

где Q – количество израсходованного топлива, кг/100км; H_u – низшая теплота сгорания топлива, МДж/кг [8, 9]. Для дизельного топлива принимается: $H_u \approx 42$ МДж/кг.

При использовании паспортных значений расхода топлива в литрах выполняется перевод в массовые единицы:

$$Q = Q_{\text{л}} \cdot \rho, \quad (3)$$

где: $Q_{\text{л}}$ – расход топлива, л/100 км; ρ – плотность топлива, кг/л.

Энергия, затрачиваемая автомобилем на преодоление сопротивления движению на горизонтальном участке дороги, определяется через работу силы сопротивления:

$$E_{\text{сн}} = \frac{M_0 \cdot g \cdot f \cdot S}{10^6}, \text{ МДж/км}, \quad (4)$$

где: M_0 – снаряженная масса автомобиля, кг; f – коэффициент дорожного сопротивления $f=0,03$; S – пройденный путь, м.

Для оценки затрат энергии на пути 1 км принимаем:

$$S=1000 \text{ м.}$$

Тогда выражение (4) примет вид:

$$E_{\text{сн}} = \frac{M_0 \cdot g \cdot f}{1000}, \frac{\text{МДж}}{\text{км}}. \quad (5)$$

Для сопоставления автомобилей различной массы использован показатель удельной энергоёмкости:

$$E_{\text{уд}}^{\text{экв}} = \frac{E_{\text{сн}}^{\text{экв}}}{M_0}, \quad (6)$$

где: $E_{\text{уд}}^{\text{экв}}$ – удельная энергоёмкость, МДж/(т·км).

Таблица 1 – Показатели эффективности автомобиля по энергетическому эквиваленту топлива

Table 1 – Vehicle efficiency indicators based on the energy equivalent of fuel

№	Автомобиль	Снаряженная масса, M_0 , кг	Базовая норма расхода топлива, л/100 км	$E_{\text{сн}}^{\text{экв}}$, МДж / км	$E_{\text{сн}}$, МДж / км	$\eta_{\text{эф}}$	$E_{\text{уд}}^{\text{экв}}$, МДж / т км
1	2	3	4	5	6	7	8
Бортовые с карбюраторным двигателем							
1	УАЗ-451	1510	14,0	4,61	0,44	0,10	3,05
2	ГАЗ-53А	3250	25,0	8,23	0,96	0,12	2,53
3	ЗИЛ-130	4300	31,0	10,21	1,26	0,12	2,37
4	Урал-377Н	7225	44,0	14,49	2,12	0,15	2,01
Бортовые с дизельным двигателем							
1	КамАЗ-5320	7080	25,0	9,07	2,08	0,23	1,28
2	ЗИЛ-133ГЯ	7610	25,0	9,07	2,24	0,25	1,19
3	МАЗ-5335	8250	23,0	8,35	2,43	0,29	1,01
4	Урал-4320	8050	32,0	11,61	2,37	0,20	1,44
Самосвалы с карбюраторным двигателем							
1	ЗИЛ-4546	5200	39,3	12,94	1,53	0,12	2,49
Самосвалы с дизельным двигателем							
1	КамАЗ-6522	13950	52,1	18,91	4,11	0,22	1,36
2	ГАЗ-САЗ- 35071	3870	19,9	7,22	1,14	0,16	1,87
3	МАЗ-6501А9	14425	45,4	16,48	4,25	0,26	1,14
4	БелАЗ-7540А	22500	123,5	44,82	6,62	0,15	1,99
Иномарки с дизельным двигателем							
1	Dong Feng	13850	51,0	18,51	4,08	0,22	1,336
2	TATRA 111R	10700	33,0	11,98	3,15	0,26	1,119
3	Magirus 232D19L	6000	30,0	10,89	1,77	0,16	1,815

Для сопоставления автомобилей различной массы наряду с энергетическим эквивалентом топлива использован показатель удельной энергии самопередвижения автомобиля:

$$E_{\text{уд}}^{\text{сн}} = \frac{E_{\text{сн}}}{M_0}, \quad (7)$$

где: $E_{\text{уд}}^{\text{сн}}$ – удельная энергия самопередвижения автомобиля, МДж/(т·км); $E_{\text{сн}}$ – энергия, затрачиваемая на преодоление сопротивления движению, МДж/км; M_0 – снаряженная масса автомобиля, т.

Показатель $E_{уд}^{сн}$ характеризует количество энергии, необходимое для перемещения одной тонны массы автомобиля на расстояние 1 км.

Коэффициент энергетической эффективности автомобиля определяется отношением удельной энергии самопередвижения автомобиля к удельному энергетическому эквиваленту топлива:

$$\eta_{эф} = \frac{E_{уд}^{сн}}{E_{уд}^{экв}} = \frac{E_{сн}}{M_o} \cdot \frac{M_o}{\Delta H_{экв}} = \frac{E_{сн}}{\Delta H_{экв}}$$

$$\eta_{эф} = \frac{E_{сн}}{\Delta H_{экв}} \quad (8)$$

Показатель $\eta_{эф}$ характеризует долю энергии топлива, расходуемую на преодоление сопротивления движению автомобиля.

Вычисления по уравнениям (5-8) приведены в табл. 1.

Анализ результатов таблицы 1 показывает, что удельный энергетический эквивалент топлива $E_{уд}^{экв}$ существенно различается для автомобилей разных классов и типов двигателей. Наименьшие значения $E_{уд}^{экв}$ характерны для автомобилей большой грузоподъемности с дизельными двигателями, что свидетельствует о более эффективном использовании энергии топлива. Полученные результаты показывают, что увеличение грузоподъемности автомобиля способствует снижению удельных энергетических затрат транспортного процесса (рис. 1).

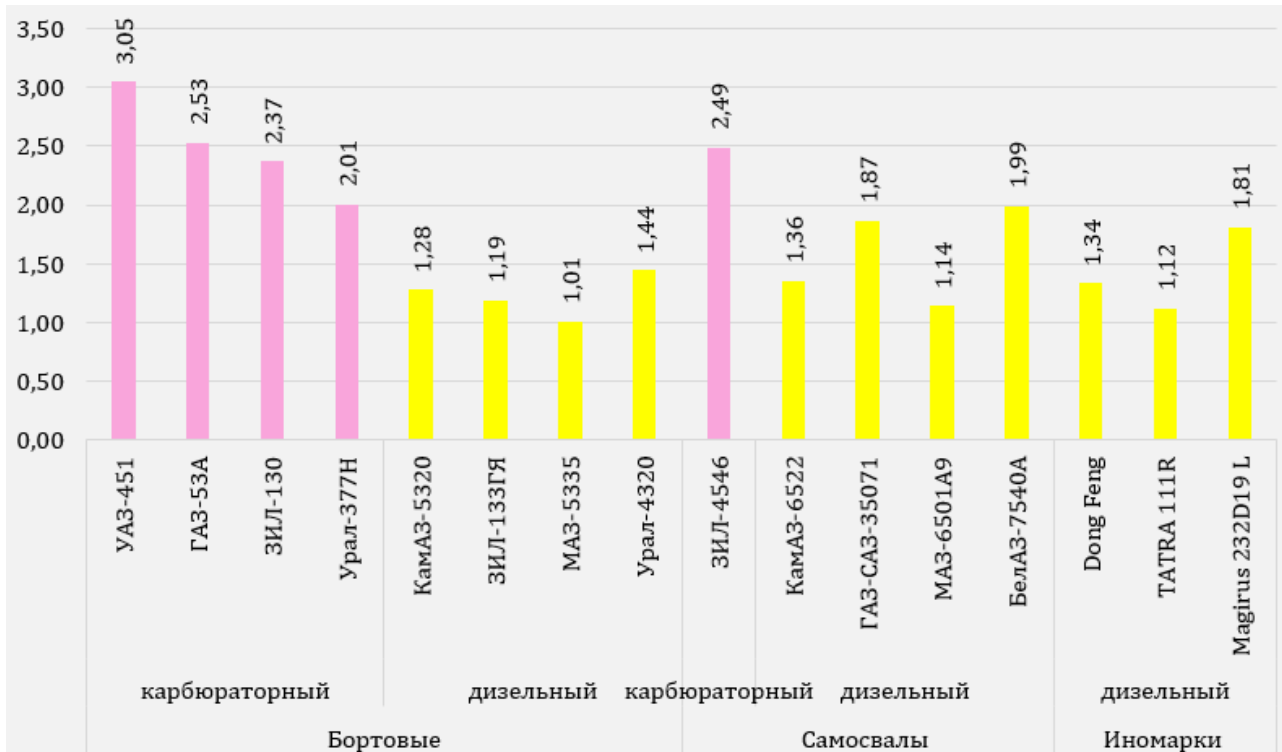


Рисунок 1 - Показатель эффективности, отражающий удельную долю расхода энергии топлива, идущая на самопередвижение автомобиля, МДж/т·км

Figure 1 – Efficiency indicator reflecting the specific share of fuel energy consumption used for the vehicle's self-propulsion, MJ/t·km

В то же время удельная энергия самопередвижения автомобилей $E_{уд}^{сн}$ для различных типов подвижного состава имеет близкие значения и составляет в среднем около 0,29 МДж/(т·км). Это объясняется тем, что данный показатель определяется в основном коэффициентом сопротивления движению и практически не зависит от массы автомобиля.

Оценка эффективности автомобиля по энергетическому содержанию топлива.

В [10-12] предложено уравнение для определения эффективности автомобиля через соотношение полезной работы ко всей затраченной при транспортном процессе на горизонтальном участке дороги

$$\mathcal{E} = \frac{P_T \cdot S}{g_L \cdot H_{\text{н}} \cdot S} \cdot 100\% = \frac{P_T}{g_L \cdot H_{\text{н}}} \cdot 100\% \quad (9)$$

где P_m – тяговое усилие автомобиля, Н; S – пройденный путь, км; g_L – линейный расход топлива (номинальный), кг/(100 км).

Для самопередвижения автомобиля тяговое усилие будет

$$P_T = M_o \cdot g \cdot f, \text{ Н.} \quad (10)$$

Линейный расход топлива (номинальный), кг/(100 км, (q_L) при снаряженной массе автомобиля, есть базовый расход топлива, низшая теплотворная способность топлива, МДж/кг, показывает его энергетическое содержание.

Уравнение 9 перепишем в виде

$$\mathcal{E}_1 = \frac{g_L \cdot H_{\text{н}}}{P_T} \cdot 100\% \quad (11)$$

Соотношение (10) показывает количество энергии топлива, расходуемое на тяговое усилие для самопередвижения автомобиля (табл. 2).

Таблица 2 – Показатели эффективности автомобиля по энергетическому содержанию топлива

Table 2 – Vehicle efficiency indicators based on the energy content of fuel

№	Автомобиль	Снаряженная масса, M_o , кг	Базовая норма расхода топлива, л/100 км	P_m , Н	$\mathcal{E}$, %	$\mathcal{E}_1$, %
1	2	3	4	5	6	7
Бортовые с карбюраторным двигателем						
1	УАЗ-451	1510	14,0	443,94	9,63	1038,32
2	ГАЗ-53 А	3250	25,0	955,50	11,61	861,46
3	ЗИЛ-130	4300	31,0	1264,20	12,39	807,37
4	Урал-377Н	7225	44,0	2124,15	14,66	682,02
Бортовые с дизельным двигателем						
1	КамАЗ-5320	7080	25,0	2081,52	22,94	395,45
2	ЗИЛ-133ГЯ	7610	25,0	2237,34	24,66	367,91
3	МАЗ-5335	8250	23,0	2425,50	29,06	312,22
4	Урал-4320	8050	32,0	2366,70	20,38	445,18
Самосвалы с карбюраторным двигателем						
1	ЗИЛ-4546	5200	39,3	1528,80	11,82	846,38
Самосвалы с дизельным двигателем						
1	КамАЗ-6522	13950	52,1	4101,30	21,69	418,26
2	ГАЗ-САЗ-35071	3870	19,9	1137,78	15,75	575,87
3	МАЗ-6501А9	14425	45,4	4240,95	25,74	352,47
4	БелАЗ-7540А	22500	123,5	6615,00	14,76	614,70
Иномарки с дизельным двигателем						
1	Dong Feng	13850	51,0	4071,90	22,00	412,38
2	TATRA 111R	10700	33,0	3145,80	26,27	345,39
3	Magirus 232D19L	6000	30,0	1764,00	16,20	559,95

Данные таблицы 2 также показывают более высокую эффективность автомобилей с дизельным двигателем, у них выше результат преобразования тепловой энергии топлива в двигателе в механическую энергию передвижения автомобиля. На единицу выполненной работы затрачивается меньшее количество энергии топлива.

Применение эффективности ($\mathcal{E}$) в уравнении в [5] можно записать

$$\mathcal{E} = \eta \cdot \eta_{\text{дв}} \quad (12)$$

где η – КПД трансмиссии, ходовой части; $\eta_{\text{дв}}$ – эффективный КПД двигателя.

$$\text{Откуда} \quad \eta = \mathcal{E} / \eta_{\text{дв}} \quad (13)$$

Эффективный КПД двигателя: карбюраторный - 0,3; дизельный - 0,4.

Для сопоставления автомобилей различной массы использован показатель удельной эффективности КПД трансмиссии:

$$E_{\text{уд}}^{\text{тр}} = \frac{\eta}{M_o}, \quad (14)$$

где: $E_{\text{уд}}^{\text{тр}}$ – показатель удельной эффективности КПД трансмиссии, 1/т; M_o – снаряженная масса автомобиля, т.

Показатель $E_{\text{уд}}^{\text{тр}}$ характеризует долю КПД трансмиссии, необходимой для перемещения одной тонны массы автомобиля на расстояние 1 км.

При вычислениях получим дополненную таблицу 3.

Таблица 3 – Показатели эффективности КПД трансмиссии
Table 3 – Transmission efficiency indicators

№	Автомобиль	Снаряженная масса, M_o , кг	Базовая норма расхода топлива, л/100 км	P_m , Н	$\mathcal{E}$, %	η	$E_{\text{уд}}^{\text{тр}}$ 1/т
1	2	3	4	5	6	7	8
Бортовые с карбюраторным двигателем							
1	УАЗ-451	1510	14,0	443,94	9,63	0,32	0,021
2	ГАЗ-53 А	3250	25,0	955,5	11,61	0,39	0,012
3	ЗИЛ-130	4300	31,0	1264,2	12,39	0,41	0,010
4	Урал-377Н	7225	44,0	2124,2	14,66	0,49	0,007
Бортовые с дизельным двигателем							
1	КамАЗ-5320	7080	25,0	2081,5	22,94	0,57	0,008
2	ЗИЛ-133ГЯ	7610	25,0	2237,3	24,66	0,62	0,008
3	МАЗ-5335	8250	23,0	2425,5	29,06	0,73	0,009
4	Урал-4320	8050	32,0	2366,7	20,38	0,51	0,006
Самосвалы с карбюраторным двигателем							
1	ЗИЛ-4546	5200	39,3	1528,8	11,82	0,39	0,008
Самосвалы с дизельным двигателем							
1	КамАЗ-6522	13950	52,1	4101,3	21,69	0,54	0,004
2	ГАЗ-САЗ-35071	3870	19,9	1137,8	15,75	0,39	0,010
3	МАЗ-6501А9	14425	45,4	4241	25,76	0,64	0,004
4	БелАЗ-7540А	22500	123,5	6615	14,76	0,37	0,002
Иномарки с дизельным двигателем							
1	Dong Feng	13850	51,0	4071,9	22,00	0,55	0,004
2	TATRA 111R	10700	33,0	3145,8	26,27	0,66	0,006
3	Magirus 232D19L	6000	30,0	1764	16,201	0,41	0,007

По данным таблицы 3 можно сделать вывод о том, что КПД трансмиссии и ходовой части автомобилей с дизельными двигателями в целом выше, чем у автомобилей с карбюраторными двигателями. Это обусловлено более высоким эффективным КПД дизельного двигателя (рис. 2).

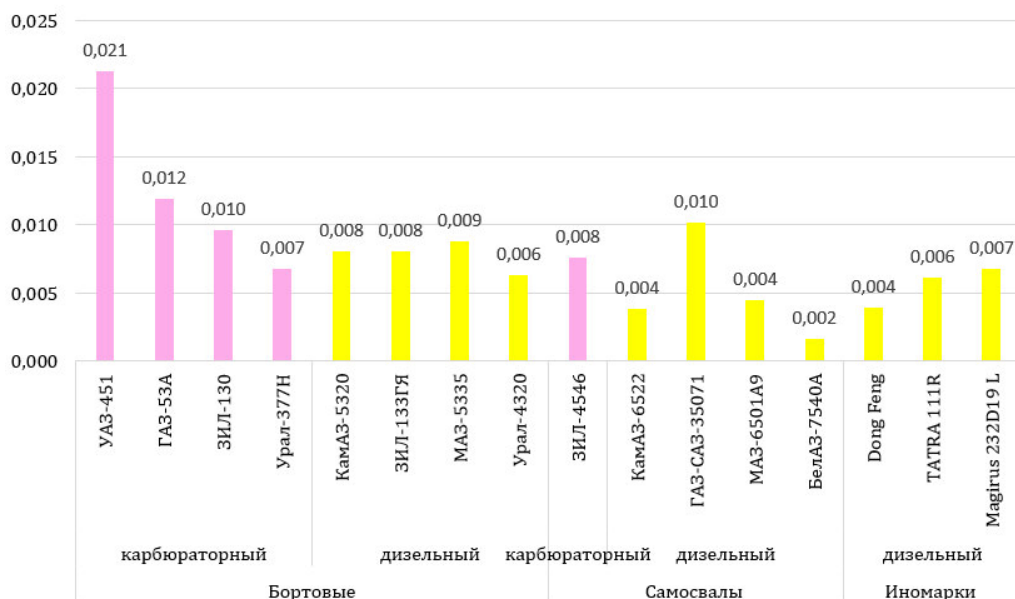


Рисунок 2 - Показатель эффективности, характеризующий долю КПД трансмиссии, необходимой для перемещения одной тонны массы автомобиля на расстояние 1 км

Figure 2 – Efficiency indicator characterizing the share of transmission efficiency required to move one tonne of vehicle mass over a distance of 1 km

Кроме того, показатель удельной эффективности КПД трансмиссии уменьшается с увеличением массы автомобиля, поскольку для перемещения более тяжёлых транспортных средств требуется больше энергии.

Проведенные исследования показывают, что использование удельных энергетических показателей позволяет объективно сравнивать эффективность эксплуатации автомобилей различных классов, грузоподъемности и конструктивных схем.

Установлено, что наиболее информативным показателем является удельный энергетический эквивалент топлива $E_{уд}^{ЭКВ}$, выраженный в МДж/(т·км), поскольку данный показатель одновременно учитывает расход топлива и массу автомобиля.

Результаты расчетов показывают, что удельная энергия самопередвижения автомобилей $E_{уд}^{СН}$ для различных типов подвижного состава имеет близкие значения и в среднем составляет около 0,29 МДж/(т·км). Это объясняется тем, что данный показатель определяется главным образом коэффициентом сопротивления движению и практически не зависит от массы автомобиля.

В то же время удельный энергетический эквивалент топлива $E_{уд}^{ЭКВ}$ существенно различается для автомобилей разных классов и типов двигателей. Наименьшие значения $E_{уд}^{ЭКВ}$ характерны для автомобилей большой грузоподъемности с дизельными двигателями, что свидетельствует о более эффективном использовании энергии топлива.

Анализ коэффициента энергетической эффективности $\eta_{эф}$ показывает, что автомобили с дизельными двигателями обладают более высокими показателями энергетической эффективности по сравнению с автомобилями с карбюраторными двигателями. Это обусловлено более высоким эффективным коэффициентом полезного действия дизельных двигателей и меньшими удельными энергетическими затратами транспортного процесса.

Следует отметить, что предложенный подход позволяет:

- выполнять сравнительную оценку автомобилей различных классов;
- определять удельную энергоёмкость транспортного процесса;
- оценивать рациональность выбора подвижного состава;
- прогнозировать эксплуатационные затраты;
- анализировать эффективность использования энергии топлива.

К ограничениям проведенного исследования следует отнести отсутствие учета:

- дорожного рельефа;

- динамических режимов движения;
- аэродинамического сопротивления;
- технического состояния автомобиля;
- изменения массы перевозимого груза;
- режимов разгона и торможения.

Дальнейшие исследования целесообразно направить на разработку комплексной модели энергетической эффективности автомобилей с учетом реальных условий эксплуатации и транспортной работы.

Выводы и заключения

1. Разработан метод оценки эффективности эксплуатации автомобилей на основе удельных энергетических характеристик топлива.
2. Предложены показатели удельного энергетического эквивалента топлива $E_{уд}^{экв}$, удельной энергии самопередвижения автомобиля $E_{уд}^{сн}$ и коэффициента энергетической эффективности $\eta_{эф}$.
3. Установлено, что удельная энергия самопередвижения автомобилей различных классов имеет близкие значения и составляет в среднем около 0,29 МДж/(т·км).
4. Показано, что автомобили большой грузоподъемности характеризуются меньшими удельными энергетическими затратами транспортного процесса.
5. Установлено, что автомобили с дизельными двигателями обладают более высокой энергетической эффективностью по сравнению с автомобилями с карбюраторными двигателями.
6. Выявлено, что КПД трансмиссии и ходовой части автомобилей с дизельными двигателями в целом выше, чем у автомобилей с карбюраторными двигателями.
7. Показатель удельной эффективности КПД трансмиссии уменьшается с увеличением массы автомобиля, поскольку для перемещения более тяжелых транспортных средств требуется больше энергии.
8. Показано, что использование удельных энергетических показателей позволяет объективно сравнивать эффективность эксплуатации автомобилей различных типов независимо от их конструктивных особенностей.
9. Предложенный подход может быть использован при выборе подвижного состава, оценке энергоэффективности перевозок и прогнозировании эксплуатационных затрат автомобильного транспорта.

Рецензент: Давлатшоев Р.А. — к.т.н., доцент кафедры «Эксплуатация автомобильного транспорта» ЛПТУ им. акад. М.С.Осими

Литература

1. Великанов, Д.П. Избранные труды. Эффективность автомобильных транспортных средств и транспортной энергетики / Изд-во «Наука», М., 1989, – 196 с.
2. Сайдуллозода, С.С. Теоретические и практические аспекты оценки энергетических затрат автомобилей-самосвалов и модели их функционирования в карьерных условиях: монография / С.С. Сайдуллозода, К.В. Гаврилов. – Душанбе: Ирфон, 2025. – 164 с. – ISBN 978-99985–8232-3. – EDN ERLMRE.
3. Сайдуллозода, С.С. Оценка энергетических затрат автомобилей-самосвалов на основе модели их функционирования в горных условиях Республики Таджикистан: специальность 05.05.03 "Колесные и гусеничные машины": диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук / Сайдуллозода Сайвали Сайдулло. – Челябинск, 2022. – 174 с. – EDN UJQATX.
4. Коптилов, В.И. О комплексных показателях топливно-энергетической эффективности автомобиля / Автомобильная промышленность, 2012, №5 – С. 1517.
5. Коптилов, В.И. О комплексных показателях топливно-энергетической эффективности автомобиля / Автомобильная промышленность, 2012, №6 – С. 79.
6. Коптилов, В.И. О комплексных показателях топливно-энергетической эффективности автомобиля / Автомобильная промышленность, 2012, №7 – С. 1417.
7. Wang, H., High-Altitude Operation Effects on Transmission Efficiency of Heavy Vehicles, Lubrication Science, 2020.
8. Справочник экономиста-аграрника. / Василькова Т.М. и др. М.: КолосС, 2010

9. Баловнев, В.И. Автомобили и тракторы: краткий справочник / В.И. Баловнев, Р.Г. Данилов. - М.: Издательский центр «Академия», 2008. – 384 с.
10. Токарев, А.А. Топливная экономичность и тягово-скоростные качества автомобиля. – М.: Машиностроение, 1982. – 221 с.
11. Сайдуллозода, С.С. Оценка эффективности функционирования системы водитель-автомобиль-дорога-среда по энергетическим показателям / С.С. Сайдуллозода, К.В. Гаврилов, А.М. Умирзоков, А.Г. Уланов // Вестник Южно-Уральского государственного университета. Серия: Машиностроение. – 2021. – Т. 21, № 4. – С. 61-70. – DOI 10.14529/engin210406. – EDN FYNBSV.
12. Концептуальная модель оценки эффективности системы "Водитель-Автомобиль-Дорога-Среда" / А.М. Умирзоков, К.Т. Мамбеталин, С.С. Сайдуллозода, А.А. Саибов // Вестник Южно-Уральского государственного университета. Серия: Машиностроение. – 2019. – Т. 19, № 1. – С. 37-46. – DOI 10.14529/engin190104. – EDN YZSZCH.
13. Давлатшоев, Р.А. Оценка эффективности запасных тормозных систем различных компоновок при эксплуатации автомобилей в горных условиях Р.А. Давлатшоев, Б.Ж. Мажитов / Р.А. Давлатшоев, Б.Ж. Мажитов // Светоч науки. – 2025. – № 4. – С. 73-79. – EDN WOAUTU.
14. Мирзозода, С. Б. Цифровизация дорожной отрасли Таджикистана / С. Б. Мирзозода // Светоч науки. – 2025. – № 4. – С. 79-86. – EDN AIJCGH.
15. Мажитов, Б. Ж. Таҳлили таъсири ҳолати техникии ВНА ба беҳатарии ҳаракат дар роҳ / Б. Ж. Мажитов, Р. А. Давлатшоев, Н. М. Каримов // Фурӯғи илм. – 2025. – No. 4. – P. 86-91. – EDN JWAAGQ.
16. Пиров, Ж. Т. Влияние распределения транспортных потоков на скорость сообщения на трехполосных сегментах улично-дорожных сетей / Ж. Т. Пиров, Ш. А. Бозоров, Д. Д. Мухторов // Политехнический вестник. Серия: Инженерные исследования. – 2023. – № 1(61). – С. 148-152.

References

1. Velikanov, D.P. Selected Works. Efficiency of Motor Vehicles and Transport Energy. – Moscow: Nauka Publishing House, 1989. – 196 p.
2. Saidullozoda, S.S. Theoretical and Practical Aspects of Evaluating Energy Consumption of Dump Trucks and Their Operation Models under Quarry Conditions: Monograph / S.S. Saidullozoda, K.V. Gavrilov. – Dushanbe: Irfon, 2025. – 164 p. – ISBN 978-99985-8232-3. – EDN ERLMRE.
3. Saidullozoda, S.S. Assessment of Energy Consumption of Dump Trucks Based on Their Operation Model under Mountain Conditions of the Republic of Tajikistan: Specialty 05.05.03 "Wheeled and Tracked Vehicles": Dissertation for the Degree of Candidate of Technical Sciences. – Chelyabinsk, 2022. – 174 p.
4. Kopotilov, V.I. On Integrated Indicators of Fuel and Energy Efficiency of a Vehicle // Automotive Industry. – 2012. – No. 5. – P. 15–17.
5. Kopotilov, V.I. On Integrated Indicators of Fuel and Energy Efficiency of a Vehicle // Automotive Industry. – 2012. – No. 6. – P. 79.
6. Kopotilov, V.I. On Integrated Indicators of Fuel and Energy Efficiency of a Vehicle // Automotive Industry. – 2012. – No. 7. – P. 14–17.
7. Wang, H. High-Altitude Operation Effects on Transmission Efficiency of Heavy Vehicles // Lubrication Science. – 2020.
8. Handbook of the Agricultural Economist / T.M. Vasilkova et al. – Moscow: KolosS, 2010.
9. Balovnev, V.I. Automobiles and Tractors: A Brief Reference Book / V.I. Balovnev, R.G. Danilov. – Moscow: Publishing Center "Academy", 2008. – 384 p.
10. Tokarev, A.A. Fuel Efficiency and Traction-Speed Characteristics of Automobiles. – Moscow: Mashinostroenie, 1982. – 221 p.
11. Saidullozoda, S.S. Evaluation of the Efficiency of the Driver–Vehicle–Road–Environment System Functioning Based on Energy Indicators / S.S. Saidullozoda, K.V. Gavrilov, A.M. Umirzokov, A.G. Ulanov // Bulletin of the South Ural State University. Series: Mechanical Engineering. – 2021. – Vol. 21, No. 4. – P. 61–70. – DOI: 10.14529/engin210406. – EDN FYNBSV.
12. Umirzokov, A.M. Conceptual Model for Evaluating the Efficiency of the "Driver–Vehicle–Road–Environment" System / A.M. Umirzokov, K.T. Mambetalin, S.S. Saidullozoda, A.A. Saibov // Bulletin of the South Ural State University. Series: Mechanical Engineering. – 2019. – Vol. 19, No. 1. – P. 37–46. – DOI: 10.14529/engin190104. – EDN YZSZCH.
13. Davlatshoev, R.A. Evaluation of the Efficiency of Reserve Braking Systems of Various Configurations during Vehicle Operation in Mountain Conditions / R.A. Davlatshoev, B.Zh. Mazhitov // Svetoch Nauki. – 2025. – No. 4. – P. 73–79. – EDN WOAUTU.
14. Mirzozoda, S.B. Digitalization of the Road Industry of Tajikistan / S.B. Mirzozoda // Svetoch Nauki. – 2025. – No. 4. – P. 79–86.

15. Mazhitov, B.Zh. Analysis of the Influence of the Technical Condition of Vehicles on Road Traffic Safety / B.Zh. Mazhitov, R.A. Davlatshoev, N.M. Karimov // Furughi Ilm. – 2025. – No. 4. – P. 86–91.

16. Pirov, Zh.T. Influence of Traffic Flow Distribution on Travel Speed in Three-Lane Segments of Urban Road Networks / Zh.T. Pirov, Sh.A. Bozorov, D.D. Mukhtorov // Polytechnic Bulletin. Series: Engineering Research. – 2023. – No. 1(61). – P. 148–152.

МАЪЛУМОТ ДАР БОРАИ МУАЛЛИФОН - СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ - INFORMATION ABOUT AUTHORS

TJ	RU	EN
Сайдуллозода Сайвали Сайдулло	Сайдуллозода Сайвали Сайдулло	Saidullozoda Saivali Saidullo
Донишгоҳи техникии Тоҷикистон ба номи акад. М.С. Осимӣ	Таджикский технический университет имени академика М.С. Осими	Tajik Technical University named after ac. M.S. Osimi
н.и.т., дотсент	к.т.н, доцент	Candidate of Technical Sciences
saivali.saidullo@mail.ru		
ORCID: 0000-0002-9663-2453		
TJ	RU	EN
Мажитов Бахриддин Жамилович	Мажитов Бахриддин Жамилович	Mazhitov Bakhriddin Zhamilovich
Донишгоҳи техникии Тоҷикистон ба номи акад. М.С. Осимӣ	Таджикский технический университет имени академика М.С. Осими	Tajik Technical University named after ac. M.S. Osimi
н.и.т., дотсент	к.т.н, доцент	Candidate of Technical Sciences
mjbahridin@mail.ru		
ORCID Id 0000-0002-4324-7033		
TJ	RU	EN
Мамбеталин Кахим Токушевич	Мамбеталин Кахим Токушевич	Mambetalin Kakhim Tokushevich
Донишгоҳи Кокшетау ба номи Ш. Уалихонов	Кокшетауский университет имени Ш. Уалиханова	Kokshetau University named after Sh. Ualikhanov
д.и.т., профессор	д.т.н., профессор	Doctor of Technical Sciences, Professor
mr.kakhim@mail.ru		
ORCID Id 0000-0002-7409-5589		

РОЛЬ НАУЧНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ В ФОРМИРОВАНИИ СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ ДОРОЖНЫМИ АКТИВАМИ (СУДА)

С.Б. Мирзозода

Таджикский технический университет имени академика М.С. Осими, г. Душанбе, Республика Таджикистан

В статье рассматривается роль научных исследований в формировании системы управления дорожными активами в Республике Таджикистан. Показано, что современное управление автомобильными дорогами должно основываться не только на текущем ремонте и эксплуатационном содержании, но и на регулярной диагностике, цифровом учёте активов, прогнозировании состояния дорожной сети, экономико-математической оценке ремонтных мероприятий и рациональном распределении ограниченных финансовых ресурсов. Обосновано, что научные исследования являются методической основой для перехода от фрагментарного управления дорожной инфраструктурой к системной модели управления жизненным циклом автомобильных дорог. Особое внимание уделено применению показателей эксплуатационного состояния, цифровых баз данных, ГИС-технологий, методов приоритизации ремонтов и принципов управления активами. Предложена структура научного обеспечения системы управления дорожными активами, а также цикл научно обоснованного принятия решений для условий Республики Таджикистан.

Ключевые слова: научные исследования, дорожные активы, автомобильные дороги, СУДА, диагностика дорог, цифровизация, ремонтные мероприятия, ограниченные ресурсы.

НАҚШИ ТАДҚИҚОТИ ИЛМӢ ДАР РУШДИ СИСТЕМАИ ИДОРАКУНИИ ДОРОИҲОИ РОҲ (СИДР)

С.Б. Мирзозода

Донишгоҳи техникии Тоҷикистон ба номи академик М.С. Осимӣ, ш. Душанбе, Ҷумҳурии Тоҷикистон

Дар ин мақола нақши таҳқиқоти илмӣ дар таҳияи системаи идоракунии дороиҳои роҳ дар Ҷумҳурии Тоҷикистон баррасӣ мешавад. Он нишон медиҳад, ки идоракунии муносири роҳҳо бояд на танҳо ба таъмир ва нигоҳдории мунтазам, балки ба ташхиси мунтазам, баҳисобгирии дороиҳои рақамӣ, пешгӯии ҳолати шабакаи роҳҳо, арзёбии иқтисодӣ математики чораҳои таъмир ва тақсими оқилонаи захираҳои маҳдуди молиявӣ асос ёбад. Тасдиқ шудааст, ки таҳқиқоти илмӣ асоси методологиро барои гузариш аз идоракунии парокандаи инфрасохтори роҳ ба модели системавии идоракунии давраи хизматрасонии роҳ фароҳам меорад. Таваҷҷӯҳи махсус ба истифодаи нишондиҳандаҳои ҳолати истифодабарӣ, омода намудани базаҳои рақамӣ, технологияҳои ГИС, усулҳои афзалиятнокунии таъмир ва принципҳои идоракунии дороиҳо аҳамият дода мешавад. Пешниҳоди сохтори илмӣ системаи идоракунии дороиҳои роҳ, инчунин давраи қабули қарорҳои асосёфта ба далелҳо барои шароити Ҷумҳурии Тоҷикистон пешниҳод карда мешавад.

Калидвожаҳо: тадқиқоти илмӣ, дороиҳои роҳ, роҳҳои автомобилгард, СИДР, ташхиси роҳ, рақамикунӣ, фаъолияти таъмир, захираҳои маҳдуд.

THE ROLE OF SCIENTIFIC RESEARCH IN THE DEVELOPMENT OF A ROAD ASSET MANAGEMENT SYSTEM (RAMS)

S.B. Mirzozoda

Tajik Technical University named after Academician M.S. Osimi, Dushanbe, Republic of Tajikistan

This article examines the role of scientific research in the development of a road asset management system in the Republic of Tajikistan. It is shown that modern road management should be based not only on routine repairs and operational maintenance, but also on regular diagnostics, digital asset accounting, road network condition forecasting, economic and mathematical assessment of repair measures, and the rational allocation of limited financial resources. It is substantiated that scientific research provides a methodological basis for the transition from fragmented road infrastructure management to a systemic model of road lifecycle management. Particular attention is paid to the use of operational condition indicators, digital databases, GIS technologies, repair prioritization methods, and asset management principles. A structure for scientific support of a road asset management system, as well as a cycle of evidence-based decision-making for the conditions of the Republic of Tajikistan, is proposed.

Keywords: scientific research, road assets, highways, RAMS, road diagnostics, digitalization, repair activities, limited resources.

Введение

Автомобильные дороги являются одним из важнейших элементов транспортной инфраструктуры государства. Их техническое состояние непосредственно влияет на безопасность движения, транспортную доступность территорий, стоимость перевозок, развитие регионов и устойчивость экономики. Для Республики Таджикистан значение автомобильных дорог особенно велико, поскольку значительная часть территории страны имеет горный рельеф, а транспортная связь между регионами во многом зависит от устойчивой работы дорожной сети [7-13].

В современных условиях дорожная отрасль сталкивается с рядом системных проблем: физический износ покрытий, недостаточность регулярной диагностики, ограниченность финансовых ресурсов, высокая стоимость ремонтных работ, воздействие природно-климатических факторов, сложность планирования ремонта в горных условиях и необходимость цифровой трансформации управления. Решение этих задач невозможно только административными или производственными методами. Необходима научно обоснованная система управления дорожными активами, основанная на данных, расчётах, прогнозировании и оценке эффективности принимаемых решений [7-9].

Международная практика показывает, что управление дорожными активами рассматривается как часть более широкой системы управления инфраструктурными активами в течение их жизненного цикла [1, 2, 7-9]. В стандарте ISO 55000 управление активами определяется через принципы, терминологию и ожидаемые результаты, необходимые для формирования проактивной системы управления активами. Это означает, что автомобильная дорога должна рассматриваться не только как объект строительства или ремонта, но и как долгосрочный инфраструктурный актив, требующий постоянного учёта, оценки, прогнозирования и рационального управления [1, 7].

Для Республики Таджикистан формирование системы управления дорожными активами имеет не только техническое, но и научно-методическое значение. В условиях ограниченного бюджета особенно важно определить, какие участки дорог требуют первоочередного ремонта, какие виды работ обеспечивают наибольший эффект, как учитывать интенсивность движения, состояние покрытия, природные риски и социально-экономическую значимость дороги. Эти вопросы требуют научных исследований, математического моделирования, цифровой обработки данных и разработки прикладных методик [7-9].

Цель настоящей статьи - обосновать роль научных исследований в формировании системы управления дорожными активами в Республике Таджикистан и предложить основные направления её научно-методического обеспечения.

СУДА как объект научного исследования

Система управления дорожными активами (СУДА) представляет собой совокупность организационных, технических, информационных, экономических и методических инструментов, направленных на обеспечение эффективного функционирования автомобильных дорог в течение их жизненного цикла. В отличие от традиционного подхода, при котором основное внимание уделяется выполнению отдельных ремонтных работ, система управления активами ориентирована на долгосрочное сохранение стоимости инфраструктуры, повышение качества дорог и рациональное использование ресурсов [7].

Согласно подходам PIARC, дорожные активы должны управляться на основе достоверной информации, оценки состояния, анализа рисков, планирования жизненного цикла и выбора оптимальных стратегий обслуживания [2]. Руководства World Bank и AASHTO также подчёркивают, что эффективное управление дорожной инфраструктурой невозможно без системы данных, регулярного мониторинга, оценки эффективности и планирования на основе показателей состояния [3, 4].

С научной точки зрения система управления дорожными активами включает несколько взаимосвязанных блоков [7]:

- инвентаризация дорожных активов;
- сбор и обновление данных о состоянии дорог;
- диагностика и оценка эксплуатационного состояния;
- прогнозирование ухудшения состояния дорожных покрытий;
- экономическая оценка ремонтных мероприятий;
- приоритизация участков при ограниченных ресурсах;
- формирование программ ремонта и содержания;
- мониторинг результатов и корректировка решений.

Каждый из этих блоков требует научного обеспечения. Например, инвентаризация требует разработки структуры базы данных; диагностика - методик оценки состояния; прогнозирование -

математических моделей деградации покрытия; приоритизация - критериев выбора ремонтных мероприятий; экономическая оценка - расчёта затрат и эффектов на жизненном цикле дороги.

Таким образом, СУДА не может быть сведена только к программному обеспечению или электронной базе данных. Это комплексная научно-практическая система, в которой цифровые инструменты должны опираться на методики, показатели, алгоритмы и организационные процедуры.

Роль научных исследований в формировании СУДА

Научные исследования формируют основу системы управления дорожными активами по нескольким направлениям. Во-первых, они позволяют определить, какие показатели следует использовать для оценки состояния дорог. Во-вторых, они обеспечивают разработку методов обработки и интерпретации диагностических данных. В-третьих, они дают возможность обосновать ремонтные решения не субъективно, а на основе расчётов, сравнений и прогнозов. Для дорожной отрасли Республики Таджикистан научные исследования особенно важны по следующим причинам:

- дорожная сеть функционирует в сложных горных условиях;
- значительная часть дорог подвержена воздействию осадков, перепадов температур, водной эрозии, селевых и оползневых процессов;
- финансовые ресурсы на ремонт и содержание ограничены;
- состояние дорог неоднородно по регионам и категориям;
- требуется переход от разрозненного учёта к цифровой системе управления;
- необходима подготовка инженерных кадров, способных работать с данными и моделями.

Научные исследования позволяют перейти от вопроса «где требуется ремонт?» к более сложной системе вопросов: какой участок ремонтировать первым, какой вид ремонта выбрать, какой эффект будет получен, как изменится состояние дороги через несколько лет, какие затраты будут минимальными на жизненном цикле, какие риски следует учитывать при планировании [7].

На Рис. 1 представлена общая схема научного обеспечения формирования системы управления дорожными активами.



Рисунок 1 - Научное обеспечение формирования СУДА

Figure 1 – Scientific support for the formation of the Road Asset Management System (RAMS)

Как видно из Рис. 1, научные исследования обеспечивают связь между фактическими данными о состоянии автомобильных дорог и управленческими решениями. Данные диагностики, инвентаризации и эксплуатации поступают в аналитический блок, где выполняются оценка состояния, прогнозирование и приоритизация. На этой основе формируются ремонтные программы, которые затем проверяются через мониторинг результатов.

Диагностика состояния автомобильных дорог как научная основа СУДА

Диагностика является исходной основой системы управления дорожными активами. Без регулярной и достоверной оценки состояния дорожной сети невозможно обоснованно планировать ремонтные работы и распределять бюджетные средства. При отсутствии данных решения часто

принимаются на основе визуального впечатления, срочности обращения или локальных жалоб, что не всегда обеспечивает наилучший результат для всей сети [7].

Современная диагностика автомобильных дорог включает визуальное обследование, измерение ровности, оценку дефектов покрытия, определение прочности дорожной одежды, обследование водоотвода, мостов, труб и других инженерных сооружений. В международной практике широко используются показатели ровности, дефектности, остаточного ресурса, безопасности и стоимости жизненного цикла [5, 6].

Для условий Таджикистана особое значение имеет комплексная оценка состояния дорог. Только один показатель не может полностью отражать эксплуатационное состояние дороги. Например, показатель ровности может характеризовать комфорт и транспортные издержки, но не всегда полно показывает структурные повреждения покрытия. Визуальная оценка дефектов позволяет фиксировать трещины, выбоины, колеи и просадки, но требует нормирования и сопоставления с другими параметрами [7].

Поэтому научная задача состоит в разработке интегральных подходов к оценке состояния дорог. Такие подходы могут включать:

- показатель продольной ровности покрытия;
- визуальную оценку дефектов;
- техническую категорию дороги;
- интенсивность движения;
- долю тяжёлого транспорта;
- природно-климатические условия;
- уровень риска;
- стоимость ремонтных мероприятий.

Научная обработка диагностических данных позволяет классифицировать участки дорог по состоянию: хорошее, удовлетворительное, неудовлетворительное, плохое или критическое. Такая классификация имеет практическое значение, поскольку для каждого класса состояния можно определить рекомендуемый вид воздействия: текущее содержание, профилактический ремонт, средний ремонт, капитальный ремонт или реконструкцию [7-9].

Цифровая база данных как информационная основа управления дорожными активами

Одним из центральных элементов СУДА является цифровая база данных дорожных активов. Она должна содержать не только паспортную информацию о дороге, но и сведения о её состоянии, конструктивных характеристиках, ремонтах, интенсивности движения, инженерных сооружениях, природных рисках и затратах [7].

В традиционной системе управления данные часто хранятся разрозненно: часть информации находится в проектной документации, часть - в отчётах обследований, часть - в бухгалтерских документах, часть - в локальных таблицах. Такая структура затрудняет анализ и не позволяет быстро принимать решения. СУДА требует единой информационной среды, в которой данные связаны с конкретными участками дорожной сети.

Научные исследования здесь необходимы для решения следующих задач:

1. Определить состав обязательных данных;
2. Разработать структуру цифрового паспорта дороги;
3. Установить правила линейной привязки участков;
4. Определить периодичность обновления данных;
5. Разработать методы контроля качества информации;
6. Связать данные диагностики с ремонтными решениями;
7. Обеспечить возможность анализа и визуализации в ГИС-среде.

Для Республики Таджикистан цифровая база данных должна учитывать специфику дорожной сети. В неё целесообразно включать сведения о горных участках, опасных зонах, селевых и оползневых рисках, водоотводных сооружениях, мостах, трубах, тоннелях, сезонной доступности и участках с повышенной аварийностью.

Данные таблицы 1 показывают, что цифровая база СУДА должна быть не просто архивом сведений, а инструментом анализа и принятия решений. Чем полнее и достовернее данные, тем точнее можно определить приоритетность ремонта, прогнозировать состояние дорог и обосновывать финансирование.

Таблица 1 - Рекомендуемая структура цифровой базы данных дорожных активов
Table 1 – Recommended structure of a digital road asset database

№	Блок данных	Содержание	Значение для СУДА
1	Паспортные данные дороги	Наименование, категория, протяжённость, балансодержатель	Идентификация объекта управления
2	Линейная привязка	Километраж, участки, координаты, начало и конец сегмента	Связь данных с конкретным участком сети
3	Технические параметры	Ширина проезжей части, число полос, тип покрытия, конструкция одежды	Оценка соответствия нормативным требованиям
4	Диагностика покрытия	Ровность, дефекты, прочность, сцепные качества	Определение эксплуатационного состояния
5	Искусственные сооружения	Мосты, трубы, подпорные стены, водоотвод	Учёт инженерных активов и рисков
6	Транспортная нагрузка	Интенсивность движения, состав потока, тяжёлый транспорт	Оценка нагрузки и приоритетности ремонта
7	Природные риски	Оползни, сели, лавины, эрозия, подтопления	Адаптация решений к горным условиям
8	История ремонтов	Вид ремонта, год выполнения, стоимость, подрядчик	Анализ эффективности ранее принятых решений
9	Финансовые данные	Затраты на содержание, ремонт, реконструкцию	Экономическое планирование
10	Безопасность движения	ДТП, опасные участки, видимость, геометрия	Учет факторов безопасности

Научное прогнозирование состояния дорог и планирование ремонтов

Одной из важнейших функций СУДА является прогнозирование изменения состояния автомобильных дорог. Дорожное покрытие постепенно ухудшается под воздействием транспортной нагрузки, климата, качества материалов, водоотвода и условий эксплуатации. Если ремонт выполняется слишком поздно, стоимость восстановления значительно возрастает. Поэтому научно обоснованное управление должно определять не только текущее состояние дороги, но и ожидаемую динамику её ухудшения.

Прогнозирование состояния дорог может выполняться на основе эмпирических, статистических, инженерных и экономико-математических моделей. В простейшем виде модель может учитывать годовое ухудшение показателя ровности или дефектности. В более сложном варианте учитываются интенсивность движения, доля тяжёлого транспорта, климатическая зона, тип покрытия, возраст конструкции и история ремонтов [7].

С научной точки зрения важно определить момент, когда профилактический или средний ремонт является более выгодным, чем ожидание полного разрушения покрытия. Это соответствует принципам управления жизненным циклом, которые широко применяются в международной практике управления дорожными активами [3, 4, 7].

Для условий ограниченного финансирования особенно важна задача приоритизации. Дорожная организация обычно не может отремонтировать все проблемные участки одновременно. Поэтому необходимо выбрать такие участки, где ремонт даст наибольший технический, экономический и социальный эффект.

Приоритизация может учитывать следующие критерии:

- текущее состояние покрытия;
- интенсивность движения;
- категория дороги;
- социально-экономическая значимость участка;

- стоимость ремонта;
- ожидаемое улучшение состояния;
- влияние на безопасность движения;
- природные риски;
- срок службы после ремонта;
- соотношение затрат и результата.

На **Рис. 2** представлена схема цикла научно обоснованного управления дорожными активами.



Рисунок 2 - Цикл научно обоснованного управления дорожными активами
Figure 2 – Cycle of evidence-based road asset management

Данный рисунок показывает, что СУДА должна функционировать как непрерывный цикл. Сначала выполняется сбор данных, затем проводится научный анализ, прогнозируется состояние дороги, определяется приоритетность ремонта, принимаются ремонтные решения и оценивается их результат. После этого данные обновляются, и цикл повторяется.

Экономико-математическое обоснование ремонтных мероприятий

Научные исследования играют ключевую роль в экономическом обосновании ремонтных мероприятий в системе управления дорожными активами. В условиях ограниченного финансирования главная задача дорожной отрасли состоит не только в выполнении отдельных ремонтных работ, но и в получении максимального технического, экономического и социального эффекта от каждого вложенного ресурса. Такой подход соответствует принципам управления активами в течение жизненного цикла, согласно которым управленческие решения должны приниматься на основе достоверных данных, оценки состояния, анализа затрат, прогнозирования последствий и сравнения возможных вариантов ремонта [1, 3, 4].

Экономическая эффективность ремонтных мероприятий может оцениваться через снижение эксплуатационных затрат пользователей дороги, увеличение срока службы покрытия, повышение скорости движения, снижение аварийности, уменьшение транспортных издержек и предотвращение более дорогого капитального ремонта в будущем [3, 6]. При этом важно учитывать не только прямые затраты дорожной организации, но и косвенные потери пользователей дороги, связанные с ухудшением состояния покрытия, снижением скорости движения, ростом расхода топлива, увеличением времени поездки и снижением надёжности транспортной связи [3, 6, 7].

Для научного обоснования ремонтных программ в составе СУДА могут применяться следующие методы: анализ затрат жизненного цикла, сравнительная оценка вариантов ремонта, многокритериальная приоритизация, оптимизация при бюджетных ограничениях, сценарное планирование, оценка риска и неопределённости, а также расчёт интегрального эффекта. Эти методы позволяют перейти от субъективного выбора участков к расчётному обоснованию ремонтной программы и обеспечить более рациональное распределение ограниченных финансовых ресурсов [4, 7].

В условиях ограниченного бюджета задача выбора ремонтных участков может быть представлена как задача оптимального распределения финансовых ресурсов. В упрощённом виде она может быть записана следующим образом [4, 7]:

$$\max Z = \sum_{i=1}^n E_i x_i, \quad (1)$$

при ограничении:

$$\sum_{i=1}^n C_i x_i \leq B, \quad (2)$$

где Z - суммарный эффект от реализации ремонтной программы;

E_i - ожидаемый эффект от ремонта i -го участка дороги;

C_i - стоимость ремонта i -го участка;

B - общий доступный бюджет;

x_i - переменная выбора участка, принимающая значение 1, если участок включается в программу ремонта, и 0, если участок не включается в программу;

n - количество рассматриваемых участков дорожной сети.

Такая постановка позволяет выбрать не просто наиболее повреждённые участки, а те объекты, ремонт которых обеспечивает наибольший эффект при заданном объёме финансирования. В качестве эффекта E_i могут использоваться снижение показателя неровности, улучшение категории эксплуатационного состояния, уменьшение транспортных издержек, повышение безопасности движения или интегральный показатель, объединяющий технические, экономические и социальные критерии [3, 4, 7].

Для пояснения приведём условный пример выбора ремонтных участков при ограниченном бюджете. Предположим, что дорожная организация имеет бюджет $B = 1,0$ млн сомони и рассматривает четыре участка дороги, требующие ремонта. Для каждого участка определены ориентировочная стоимость работ и ожидаемый эффект, выраженный в условных баллах. Такой подход соответствует логике многокритериальной оценки и приоритизации ремонтных мероприятий в системе управления дорожными активами [4, 7].

Таблица 2 - Условный пример выбора ремонтных участков при ограниченном бюджете

Table 2 – Hypothetical example of selecting repair sections under budget constraints

Участок дороги	Стоимость ремонта, млн сомони	Ожидаемый эффект, балл	Эффект на 1 млн сомони
Участок 1	0,40	35	87,5
Участок 2	0,60	42	70,0
Участок 3	0,50	38	76,0
Участок 4	0,30	24	80,0

Если выбирать участки только по величине ожидаемого эффекта, то приоритет может быть отдан участкам 2 и 3. Однако их суммарная стоимость составит:

$$0,60 + 0,50 = 1,10 \text{ млн сомони,}$$

что превышает имеющийся бюджет. Следовательно, такое решение не может быть принято при заданном бюджетном ограничении. Рассмотрим допустимые комбинации.

Выбор участков 1 и 3 потребует:

$$0,40 + 0,50 = 0,90 \text{ млн сомони,}$$

а суммарный эффект составит: $35 + 38 = 73$ балла.

Выбор участков 2 и 4 также укладывается в бюджет:

$$0,60 + 0,30 = 0,90 \text{ млн сомони,}$$

но суммарный эффект будет равен: $42 + 24 = 66$ баллов.

Выбор участков 1 и 4 потребует:

$$0,40 + 0,30 = 0,70 \text{ млн сомони,}$$

а суммарный эффект составит: $35 + 24 = 59$ баллов.

Следовательно, при заданных исходных данных наиболее рациональным решением является включение в ремонтную программу участков 1 и 3, поскольку данная комбинация не превышает установленный бюджет и обеспечивает наибольший суммарный эффект среди рассмотренных допустимых вариантов. Приведённый пример показывает, что экономико-математический подход позволяет перейти от субъективного выбора участков к расчётному обоснованию ремонтной программы [4, 7].

Для Республики Таджикистан такая постановка имеет особое значение, поскольку потребность в ремонте автомобильных дорог может превышать ежегодные финансовые возможности дорожной отрасли. В этих условиях СУДА должна обеспечивать не только сбор и хранение данных, но и аналитическую поддержку решений, позволяющую определить приоритетные участки, сравнить варианты ремонта и обосновать распределение ограниченных ресурсов [7-9].

В составе СУДА подобная модель может быть дополнена показателями интенсивности движения, категории дороги, природных рисков, социально-экономической значимости участка, аварийности, стоимости жизненного цикла и прогнозируемого ухудшения состояния покрытия [3, 6, 7]. Это позволит формировать ремонтные программы не только по текущему состоянию покрытия, но и с учётом долгосрочного эффекта от принятых решений.

Систематизированное представление научных методов, применимых при формировании СУДА, приведено в таблице 3.

Таблица 3 - Научные методы, применимые при формировании СУДА
Table 3 – Scientific methods applicable to the development of the Road Asset Management System (RAMS)

№	Научный метод	Содержание метода	Практическое применение в СУДА
1	Диагностическая оценка	Измерение и классификация состояния дорог	Определение участков, требующих ремонта
2	Нормирование показателей	Приведение различных показателей к единой шкале	Сравнение участков между собой
3	Прогнозирование	Расчёт будущего состояния дороги	Планирование ремонта на несколько лет
4	Многокритериальный анализ	Учет технических, экономических и социальных факторов	Выбор приоритетных участков
5	Оптимизация бюджета	Выбор ремонтных мероприятий при ограниченных ресурсах	Рациональное распределение финансирования
6	Анализ жизненного цикла	Оценка затрат на протяжении срока службы дороги	Выбор экономически выгодной стратегии
7	ГИС-анализ	Пространственная обработка дорожных данных	Визуализация состояния сети и рисков
8	Мониторинг эффективности	Сравнение состояния до и после ремонта	Корректировка будущих программ

Как видно из таблицы 3, научные методы позволяют превратить управление дорогами из набора разрозненных действий в последовательный процесс принятия решений. При этом каждый метод имеет прикладное значение и может быть использован в деятельности дорожных организаций при диагностике, планировании, финансировании и контроле эффективности ремонтных мероприятий.

Таким образом, экономико-математическое обоснование ремонтных мероприятий является одним из ключевых элементов СУДА. Оно обеспечивает рациональное распределение ограниченных ресурсов, повышает прозрачность принятия решений и позволяет формировать ремонтные программы на основе измеримых технических, экономических и социальных критериев. Такой подход превращает управление автомобильными дорогами из системы реагирования на повреждения в научно обоснованный механизм планирования, прогнозирования и повышения эффективности дорожной отрасли [1, 3, 4, 7].

Особенности формирования СУДА в Таджикистане

Формирование системы управления дорожными активами в Республике Таджикистан должно учитывать национальные, природные, технические и организационные особенности. Нельзя механически перенести зарубежную модель без адаптации к местным условиям. Международный опыт важен, но он должен быть переработан с учётом структуры дорожной сети, горного рельефа, доступности данных, уровня финансирования и существующей системы управления. К основным особенностям, которые необходимо учитывать, относятся:

- высокая доля горных дорог;
- воздействие природных рисков;
- сезонные ограничения эксплуатации;
- ограниченность финансовых ресурсов;
- необходимость поэтапного внедрения цифровых технологий;
- различный уровень технического состояния дорог;
- недостаточность регулярной инструментальной диагностики;
- потребность в подготовке специалистов по СУДА.

На первом этапе целесообразно формировать базовый цифровой реестр автомобильных дорог, включающий паспортные данные, линейную привязку, категорию, тип покрытия и основные сведения о состоянии. На втором этапе необходимо подключить результаты диагностики, данные о ремонтах, интенсивности движения и инженерных сооружениях. На третьем этапе возможно внедрение аналитических модулей прогнозирования и оптимизации.

Такой поэтапный подход более реалистичен, чем попытка сразу создать сложную цифровую платформу. Важно, чтобы система начиналась с достоверных данных и постепенно развивалась в направлении аналитики, планирования и поддержки управленческих решений.

Практические направления научного обеспечения СУДА

Для формирования системы управления дорожными активами в Таджикистане можно выделить несколько практических направлений научного обеспечения.

Первое направление - разработка методики диагностики и классификации состояния дорог. Она должна учитывать не только визуальные дефекты, но и измеряемые показатели, транспортную нагрузку, категорию дороги и условия эксплуатации.

Второе направление - создание цифровой структуры дорожных данных. Необходимо определить, какие сведения должны собираться, как они должны храниться, как обновляться и как использоваться для планирования ремонта.

Третье направление - разработка модели приоритизации ремонтных мероприятий. Эта модель должна позволять сравнивать разные участки дорог и выбирать наиболее важные объекты при ограниченном бюджете.

Четвёртое направление - адаптация международного опыта управления активами к условиям Таджикистана. Речь идёт не о прямом копировании зарубежных систем, а о переносе принципов: управление жизненным циклом, оценка состояния, анализ затрат, цифровой учёт и мониторинг эффективности.

Пятое направление - подготовка кадров. СУДА требует специалистов, которые понимают дорожную диагностику, цифровые базы данных, ГИС, экономическую оценку, моделирование и организацию ремонтных работ.

Шестое направление - пилотное внедрение. Научные методики необходимо проверять на конкретных участках дорог. Пилотный проект может включать обследование участка, создание цифрового паспорта, оценку состояния, выбор ремонтной стратегии и анализ ожидаемого эффекта.

Практические рекомендации

На основе проведённого анализа можно предложить следующие рекомендации для формирования системы управления дорожными активами в Республике Таджикистан:

1. *Разработать национальную методику оценки состояния автомобильных дорог*, учитывающую показатели ровности, дефектности, транспортной нагрузки, категории дороги и природно-климатических условий [7].

2. *Создать поэтапную цифровую базу дорожных активов*, начиная с паспортных данных и линейной привязки, с последующим включением диагностики, истории ремонтов, финансовых данных и природных рисков [7-9].

3. *Внедрить регулярную диагностику дорожных покрытий*, включая визуальные обследования и инструментальные измерения на ключевых участках сети [7].

4. *Разработать модель приоритизации ремонтных мероприятий*, позволяющую выбирать участки на основе технического состояния, интенсивности движения, стоимости ремонта и ожидаемого эффекта [7].

5. *Использовать ГИС-технологии* для пространственного анализа дорожной сети, отображения состояния участков, природных рисков и планируемых ремонтных мероприятий.

6. *Выполнить пилотное внедрение СУДА* на ограниченном фрагменте дорожной сети с последующим масштабированием на региональный и национальный уровень [7-9].

7. *Усилить связь университетской науки и дорожных организаций*, чтобы научные исследования выполнялись на основе реальных данных и решали практические задачи отрасли.

8. *Обновить образовательные программы дорожного профиля*, включив в них дисциплины по управлению дорожными активами, цифровизации, диагностике, ГИС и экономико-математическому моделированию.

Заключение

Научные исследования играют ключевую роль в формировании системы управления дорожными активами в Республике Таджикистан. Они обеспечивают методическую основу для диагностики, цифрового учёта, прогнозирования состояния дорог, приоритизации ремонтов и рационального распределения ограниченных финансовых ресурсов.

СУДА должна рассматриваться не только как информационная система, но и как научно-практический механизм управления жизненным циклом автомобильных дорог. Её эффективность зависит от качества исходных данных, корректности методик оценки, наличия моделей прогнозирования, обоснованности ремонтных решений и постоянного мониторинга результатов.

Для условий Таджикистана особенно важно учитывать горный рельеф, природные риски, ограниченность ресурсов и необходимость поэтапного внедрения цифровых технологий. Наиболее рациональным является постепенное формирование СУДА: от цифрового реестра и диагностики к аналитике, прогнозированию и оптимизации ремонтных программ.

Практическая значимость научных исследований заключается в том, что они позволяют перейти от реагирования на уже возникшие разрушения к плановому, профилактическому и экономически обоснованному управлению дорожной сетью. Такой подход способен повысить эффективность дорожной отрасли, улучшить состояние автомобильных дорог, снизить затраты на жизненном цикле и обеспечить более устойчивое развитие транспортной инфраструктуры Республики Таджикистан.

Рецензент: Умарзода С.С. - к.т.н., и.о. доцента кафедры "Строительство дорог, сооружений и транспортных коммуникаций" ПТТУ им. акад. М.С. Осими.

Литература

1. ISO 55000:2024. Asset management - Vocabulary, overview and principles. International Organization for Standardization, 2024.
2. PIARC. Asset Management Manual. World Road Association, 2017.
3. Gericke B., Henning T., Greenwood I. A Guide to Delivering Good Asset Management in the Road Sector through Performance Based Contracting. Washington, DC: World Bank, 2014.
4. AASHTO. Transportation Asset Management Guide: A Focus on Implementation. American Association of State Highway and Transportation Officials, 2011.
5. Paterson W.D.O. Road Deterioration and Maintenance Effects: Models for Planning and Management. Baltimore: Johns Hopkins University Press, 1987.
6. Kerali H.G.R. Overview of HDM-4: The Highway Development and Management Series. Washington, DC: World Bank, 2000.
7. Мирзозода, С.Б. Система управления дорожными активами (СУДА): монография / С.Б. Мирзозода, О.А. Красиков, Б.Б. Каримов. - Душанбе: Ирфон, 2023. - 264 с. УДК 625.7/8(075.8), ББК 39.311я73, К78

8. Мирзозода, С.Б. Основные показатели транспортно-эксплуатационного состояния автомобильных дорог Таджикистана / С.Б. Мирзозода, Ж.И. Содиков, Ф.С. Мирзоев // Политехнический вестник, Серия: Инженерные исследования. Душанбе: ТТУ, - 2025. - № 3(71)2025. - С. 98-103. ISSN: 2520-2227

9. Мирзозода, С.Б. Решение некоторых задач по системе управления дорожными активами / С.Б. Мирзозода, О.А. Красиков, И.Н. Косенко. // Политехнический вестник, Серия: Инженерные исследования, - Душанбе: ТТУ, -2024. - № 1(65)2024. -С.146-152. ISSN: 2520-2227.

10. Давлатшоев, Р. А. Оценка эффективности запасных тормозных систем различных компоновок при эксплуатации автомобилей в горных условиях Р.А. Давлатшоев, Б.Ж. Мажитов / Р. А. Давлатшоев, Б. Ж. Мажитов // Светоч науки. – 2025. – № 4. – С. 73-79. – EDN WOAUTU.

11. Мажитов, Б. Ж. Таҳлили таъсири ҳолати техникии ВНА ба бехатарии ҳаракат дар роҳ / Б. Ж. Мажитов, Р. А. Давлатшоев, Н. М. Каримов // Фурӯғи илм. – 2025. – №. 4. – Р. 86-91. – EDN JWAAGQ.

12. Мирзозода, С. Б. Цифровизация дорожной отрасли Таджикистана / С. Б. Мирзозода // Светоч науки. – 2025. – № 4. – С. 79-86. – EDN AIJCGH.

13. Анализ и оценка заторовых явлений на автомобильных дорогах / А. М. Умирзоков, Б. М. Курбоналиев, Н. К. Раджабзода [и др.] // Светоч науки. – 2026. – № 1. – С. 70-77. – DOI 10.24412/3078-395X-2026-1-7-70-79. – EDN KYPSTQ.

References

1. ISO 55000:2024. Asset management - Vocabulary, overview and principles. International Organization for Standardization, 2024.

2. PIARC. Asset Management Manual. World Road Association, 2017.

3. Gericke, B., Henning, T., & Greenwood, I. (2014). A Guide to Delivering Good Asset Management in the Road Sector through Performance Based Contracting. Washington, DC: World Bank.

4. AASHTO. (2011). Transportation Asset Management Guide: A Focus on Implementation. American Association of State Highway and Transportation Officials.

5. Paterson, W. D. O. (1987). Road Deterioration and Maintenance Effects: Models for Planning and Management. Baltimore: Johns Hopkins University Press.

6. Kerali, H. G. R. (2000). Overview of HDM-4: The Highway Development and Management Series. Washington, DC: World Bank.

7. Mirzozoda, S. B., Krasikov, O. A., & Karimov, B. B. (2023). Road asset management system (RAMS): monograph. Dushanbe: Irfon.

8. Mirzozoda, S. B., Sodikov, Zh. I., & Mirzoev, F. S. (2025). Main indicators of the transport and operational state of highways in Tajikistan. Polytechnical Bulletin. Series: Engineering Studies, (3), 98-103.

9. Mirzozoda, S. B., Krasikov, O. A., & Kosenko, I. N. (2024). Solving some problems on the road asset management system. Polytechnical Bulletin. Series: Engineering Studies, (1), 146-152.

10. Davlatshoev, R. A., & Mazhitov, B. Zh. (2025). Evaluation of the effectiveness of secondary brake systems of various configurations when operating vehicles in mountainous conditions. Svetoch Nauki, (4), 73-79.

11. Mazhitov, B. Zh., Davlatshoev, R. A., & Karimov, N. M. (2025). Analysis of the impact of the technical condition of vehicle active safety systems on road safety. Furugi Ilm, (4), 86-91.

12. Mirzozoda, S. B. (2025). Digitalization of the road sector of Tajikistan. Svetoch Nauki, (4), 79-86.

13. Umirzokov, A. M., Kurbonaliyev, B. M., Radzhabzoda, N. K., et al. (2026). Analysis and evaluation of traffic congestion on highways. Svetoch Nauki, (1), 70-77. <https://doi.org/10.24412/3078-395X-2026-1-7-70-79>.

МАЪЛУМОТ ДАР БОРАИ МУАЛЛИФ - СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРЕ - INFORMATION ABOUT AUTHOR

TJ	RU	EN
Мирзозода Сухроб Бегмат	Мирзозода Сухроб Бегмат	Mirzozoda Suhrob Begmat
номзади илмҳои техникиӣ, и.в. дотсент	кандидат технических наук, и.о. доцента	candidate of technical sciences, acting assistant professor
Донишгоҳи Техникии Тоҷикистон ба номи академик М.С. Осимӣ	Таджикский Технический Университет имени академика М.С. Осими	Tajik Technical University named after academician M.S. Osimi
E-mail: sukhrob63@mail.ru		
ORCID 0000-0002-9817-3633		

СОХТМОН ВА МЕЪМОРӢ - СТРОИТЕЛЬСТВО И АРХИТЕКТУРА - CONSTRUCTION AND ARCHITECTURE

УДК: 699.86

DOI: 10.65599/ENG5685

ОЦЕНКА ТЕПЛОЗАЩИТНЫХ ХАРАКТЕРИСТИК НАРУЖНЫХ ОГРАЖДАЮЩИХ КОНСТРУКЦИЙ ГРАЖДАНСКИХ ЗДАНИЙ

Н.М. Каримов, Д.Ф. Каландаров, М.Х. Шарипов

Таджикский технический университет имени академика М.С. Осими, г. Душанбе, Республика Таджикистан

В настоящей статье представлен комплексный анализ современных подходов к оценке теплозащитных характеристик наружных ограждающих конструкций гражданских зданий. Особое внимание уделено повышению энергоэффективности вертикальных ограждающих конструкций зданий в климатических условиях города Худжанда. Рассмотрены расчётные методики определения теплопроводности ограждений в холодный период года и теплоустойчивости в жаркий период. Выполнен анализ теплотехнических показателей различных типов стеновых конструкций. Проведена оценка влажностного режима ограждений с построением эпюр распределения температуры и парциального давления водяного пара. Приводятся результаты расчётов на примере многослойной стеновой конструкции, подтверждающие соответствие действующим нормативам Республики Таджикистан.

Ключевые слова: энергоэффективность, энергосбережение, гражданские здания, теплоустойчивость, теплозащита, теплопроводность, ограждающие конструкции, сопротивление теплопередаче, влажностный режим, градус-суток отопительного периода (ГСОП).

БАҶОДИҲИИ ХУСУСИЯТҲОИ ГАРМИГОҶДОРИИ КОНСТРУКСИЯҲОИ БЕРУНАИ ИҶОТАВИИ БИНОҲОИ ШАҲРВАНДӢ

Н.М. Каримов, Д.Ф. Қаландаров, М.Ҳ. Шарипов

Донишгоҳи техникии Тоҷикистон ба номи академик М.С. Осимӣ, ш. Душанбе, Ҷумҳурии Тоҷикистон

Дар мақолаи мазкур таҳлили ҳамаҷонибаи равишҳои муосири арзёбии нишондиҳандаҳои гармигоҳдории конструксияҳои берунаи иҷтимоии биноҳои шаҳрвандӣ пешниҳод гардидааст. Таваҷҷуҳи махсус ба баланд бардоштани самаранокии энергетикӣ конструксияҳои иҷтимоии биноҳо дар шароити иқлимии шаҳри Хучанд равона шудааст. Методикаҳои ҳисоби муайян намудани гармгузаронии конструксияҳои иҷтимоӣ дар давраи сардии сол ва гармиустуворӣ дар давраи гарми сол дида баромада шудааст. Таҳлили муқоисавии нишондиҳандаҳои гармотехникии намудҳои гуногуни конструксияҳои деворӣ иҷро шудааст. Натиҷаҳои ҳисобҳо дар мисоли конструксияи девори бисёрқабата оварда шудаанд, ки мутобиқати онҳоро ба меъёрҳои амалкунандаи Ҷумҳурии Тоҷикистон тасдиқ менамоянд.

Калидвожаҳо: самаранокии энергетикӣ, сарфаҷӯӣ, биноҳои шаҳрвандӣ, гармиустуворӣ, гармигоҳдорӣ, гармигузаронӣ, конструксияҳои иҷтимоӣ, муқовимати гармигузаронӣ, ҳарорати шабонарӯзи давраи гармидиҳӣ (ХШДГ).

ASSESSING THE THERMAL PROTECTION PERFORMANCE OF EXTERNAL ENVELOPE STRUCTURES OF CIVIL BUILDINGS

N.M. Karimov, D.F. Kalandarov, M.H. Sharipov

Tajik Technical University named after Academician M.S. Osimi, Dushanbe, Republic of Tajikistan

This article presents a comprehensive analysis of modern approaches to evaluating the thermal protection performance of external envelope structures of civil buildings. Particular attention is paid to improving the energy efficiency of building envelopes under the climatic conditions of the city of Khujand. Calculation methods for determining thermal conductivity of enclosing structures during the cold season and thermal stability during the hot season are examined. A comparative analysis of the thermotechnical parameters of various types of wall structures has been performed. The moisture regime of the enclosures has been assessed with temperature distribution and vapor pressure diagrams. The results of calculations are provided using the example of a multilayer wall structure, confirming compliance with the current regulatory standards of the Republic of Tajikistan.

Keywords: energy efficiency, energy saving, civil buildings, thermal stability, thermal protection, thermal conductivity, building envelope structures, thermal resistance, heating degree days for the heating season(HDD).

Введение

На рубеже XX–XXI веков вопросы рационального использования энергетических ресурсов приобрели особую актуальность во всём мире. По данным Международного энергетического агентства (IEA), строительная отрасль потребляет более 40% всей производимой энергии, значительная доля которой расходуется на обогрев и кондиционирование помещений. Здания и сооружения являются крупнейшими конечными потребителями энергии, опережая промышленность и транспорт [1, 9, 10, 13].

Одной из существенных причин перерасхода топлива является недостаточный уровень теплозащиты возводимых зданий. Наблюдается нерациональное использование возможных резервов теплозащиты, а также большие потери топлива и энергии [12]. Для государств с развивающейся экономикой, в частности для Республики Таджикистан минимизация теплопотерь в зимний период и защита от перегрева летом представляют собой ключевую задачу строительной отрасли. Республика расположена в зоне резко континентального климата, где амплитуда годовых температур достигает 55–60 °С. При этом значительная часть эксплуатируемого жилого фонда была возведена в советский период без надлежащего учёта современных требований энергосбережения, что приводит к перерасходу тепловой энергии, достигающему 40–60% по сравнению с нормативным уровнем [1, 5].

Город Худжанд, являющийся вторым по величине городом Республики Таджикистана, расположен в Согдийской области и характеризуется одними из наиболее экстремальных климатических условий в республике. Температура наиболее холодной пятидневки составляет -13,3 °С, абсолютный максимум достигает +46 °С, а продолжительность отопительного периода - 122 суток [6]. Данные климатические параметры предъявляют повышенные требования к теплозащитным характеристикам ограждающих конструкций.

В этой связи проектирование и возведение ограждающих конструкций необходимо осуществлять с учётом требований действующих нормативных документов Республики Таджикистан. Комплексный подход к оценке теплозащиты ограждений должен включать расчёт сопротивления теплопередаче для зимнего периода, оценку теплоустойчивости для летнего периода и анализ влажностного режима конструкции [5].

Целью настоящей работы является систематизация современных методических подходов к оценке теплозащитных характеристик наружных ограждающих конструкций и их практическая апробация на примере многослойной стеновой конструкции в климатических условиях г. Худжанда.

Материалы и методы исследования

Формирование системного подхода к энергосбережению в строительстве Республики Таджикистан осуществляется посредством комплекса законодательных и нормативных актов. Правовую основу государственной политики в области энергетики заложил Закон РТ «Об энергетике» (2000 г.), определивший стратегические цели обеспечения энергетической безопасности страны [4].

Важнейшим нормативным актом, регулирующим вопросы энергоэффективности, является Закон РТ «Об энергосбережении и энергоэффективности» (№ 1018 от 19.09.2013 г.), который установил принципы государственной политики в сфере продвижения энергоэффективности во всех отраслях экономики, включая строительный комплекс и жилищно-коммунальное хозяйство [4].

Таблица 1 – Нормативно-правовые акты РТ в области энергосбережения и теплозащиты зданий
Table 1 – Regulatory and Legal Acts of the Republic of Tajikistan in the Field of Energy Conservation and Thermal Protection of Buildings

№	Название документа	Год	Основное содержание
1	Закон РТ «Об энергосбережении и энергоэффективности» № 1018	2013	Основной закон, регулирующий политику энергосбережения в строительстве
2	Концепция развития ТЭК РТ на 2003–2015 гг.	2002	Стратегия развития топливно-энергетического комплекса
3	Программа использования ВИЭ на 2007–2015 гг.	2002	Внедрение солнечной, ветровой, геотермальной энергии
4	СНиП РТ 23-02-2021 «Тепловая защита зданий»	2021	Нормы теплозащиты, методики расчёта сопротивления теплопередаче
5	СНиП РТ 23.01-2018 «Строительная климатология»	2018	Климатические параметры для проектирования зданий

Непосредственно техническое регулирование теплозащиты зданий осуществляется посредством строительных норм и правил. СНиП РТ 23-02-2021 «Тепловая защита зданий» [5]

устанавливает методику расчёта сопротивления теплопередаче, критерии оценки теплозащиты и классификацию зданий по энергоэффективности. Климатические параметры для теплотехнических расчётов регламентируются СНиП РТ 23.01-2018 «Строительная климатология» [6].

Следует отметить, что нормативная база РТ в области теплозащиты зданий находится в процессе постоянного совершенствования. Введение СНиП РТ 23-02-2021 взамен ранее действовавших норм существенно повысило требования к сопротивлению теплопередаче наружных ограждающих конструкций, приблизив их к международным стандартам.

Таблица 2 – Климатические параметры основных городов РТ (СНиП РТ 23.01-2018)

Table 2 – Climatic parameters of the main cities of the RT (SNiP RT 23.01-2018)

Параметр	Душанбе	Худжанд	Бохтар	Хорог
Температура наиболее холодных суток, °C	-13,8	-14,8	-14,0	-19,6
Температура наиболее холодной пятидневки, °C	-9,5	-13,3	-11,5	-17,1
Продолжительность отопительного периода, сут.	110	122	100	166
Средняя температура июля, °C	27,1	28,6	28,7	22,7
Максимальная амплитуда температуры июля, °C	25,4	23,8	24,9	21,0
Абсолютная максимальная температура, °C	44	46	46	38
ГСОП, °C·сут.	1892	2107	1590	3785

Данные таблицы 2 наглядно демонстрируют, что г. Худжанд характеризуется наиболее высоким значением ГСОП (2107 °C·сут.) среди низинных городов республики, что обусловлено сочетанием продолжительного отопительного периода (122 сут.) и относительно низкой средней температуры наиболее холодной пятидневки (-13,3 °C). Одновременно абсолютный максимум температуры достигает +46 °C, что свидетельствует о необходимости обеспечения теплозащиты ограждений как от теплопотерь зимой, так и от перегрева летом.

В соответствии с положениями СНиП РТ 23-02-2021 «Тепловая защита зданий» [5], оценка теплозащитных свойств зданий осуществляется по трём ключевым критериям, каждый из которых имеет определённое физическое значение и практическую направленность.

Первый критерий - приведённое сопротивление теплопередаче отдельных элементов наружных ограждений. Данный критерий устанавливает минимально допустимый уровень теплоизоляции для каждого вида ограждающей конструкции (стены, покрытия, перекрытия, окна) в зависимости от градусо-суток отопительного периода. Выполнение данного критерия гарантирует, что теплопотери через каждый элемент оболочки здания не превысят нормативного значения.

Второй критерий - санитарно-гигиенический показатель, ограничивающий перепад между температурой внутреннего воздуха и температурой внутренней поверхности ограждения. Для наружных стен жилых зданий данный перепад не должен превышать 4 °C, а для покрытий — 3 °C. Соблюдение данного условия предотвращает образование конденсата на внутренних поверхностях и обеспечивает комфортные санитарно-гигиенические условия проживания.

Третий критерий - относительная энергоэффективность отопления здания в целом, позволяющая оптимизировать параметры теплозащиты с учётом объёмно-планировочных решений, инженерных систем и режима эксплуатации. Данный критерий предусматривает определение удельного расхода тепловой энергии на отопление и его сопоставление с нормативным значением.

Нормативное сопротивление теплопередаче $R_{\text{эф}}$ является основным расчётным параметром, характеризующим теплозащитные свойства ограждающей конструкции. Согласно СНиП РТ 23-02-2021, данная величина определяется как линейная функция градусо-суток отопительного периода (ГСОП):

$$R_{\text{сф}} = a \cdot D + b \quad (1)$$

где a, b — коэффициенты, зависящие от типа здания и вида ограждения (для наружных стен жилых зданий $a = 0,00035$, $b=1,4$); D - градусо-сутки отопительного периода (ГСОП), $^{\circ}\text{C} \cdot \text{сут}$.

Величина ГСОП вычисляется по следующему соотношению:

$$D_i = (t_{\text{int}} - t_{\text{ht}}) \cdot z_{\text{ht}} \quad (2)$$

где t_{int} — температура воздуха внутри помещения, принимаемая равной 20°C для жилых зданий [7]; t_{ht} — средняя температура наружного воздуха в отопительный период (при среднесуточной температуре ниже 8°C), $^{\circ}\text{C}$; z_{ht} — продолжительность отопительного периода, сут.

Для г. Худжанда расчёт ГСОП принимает вид: $D_i = (20 - 2,73) \cdot 122 = 2107^{\circ}\text{C} \cdot \text{сут}$. Подставляя полученное значение в формулу (1), определяем нормативное сопротивление теплопередаче для наружных стен: $R_{\text{сф}} = 0,00035 \cdot 2107 + 1 = 1,73 \text{ м}^2 \cdot ^{\circ}\text{C}/\text{Вт}$.

Общее сопротивление теплопередаче многослойной конструкции R_0 определяется с учётом сопротивлений теплоотдаче на внутренней и наружной поверхностях [5]:

$$R_0 = R_{\text{int}} + \Sigma R_i + R + R_{\text{ext}} \quad (3)$$

где $R_{\text{int}} = 1/\alpha_{\text{int}}$ - сопротивление теплоотдаче внутренней поверхности ($\alpha_{\text{int}} = 8,7 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot ^{\circ}\text{C})$, $R_{\text{int}} = 0,115 \text{ м}^2 \cdot ^{\circ}\text{C}/\text{Вт}$); $R_{\text{ext}} = 1/\alpha_{\text{ext}}$ - сопротивление теплоотдаче наружной поверхности ($\alpha_{\text{ext}} = 23 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot ^{\circ}\text{C})$, $R_{\text{ext}} = 0,043 \text{ м}^2 \cdot ^{\circ}\text{C}/\text{Вт}$); R_i - термическое сопротивление замкнутой воздушной прослойки.

Термическое сопротивление каждого однородного слоя [5]:

$$R_i = \delta_i / \lambda_i, \text{ м}^2 \cdot ^{\circ}\text{C}/\text{Вт} \quad (4)$$

где δ_i - толщина слоя, м; λ_i - расчётный коэффициент теплопроводности материала, $\text{Вт}/(\text{м} \cdot ^{\circ}\text{C})$.

Распределение температуры по толщине конструкции определяется из соотношения:

$$t_x = t_{\text{int}} - (t_{\text{int}} - t_{\text{ext}}) \cdot (R_{\text{int}} + \Sigma R_i(x)) / R_0 \quad (5)$$

где t_x - температура на границе x -го слоя, $^{\circ}\text{C}$; $\Sigma R_i(x)$ - сумма термических сопротивлений слоёв от внутренней поверхности до границы x .

Обеспечение комфортного микроклимата в жаркое время года является не менее важной задачей, чем защита от теплопотерь зимой. Для г. Худжанда, где среднемесячная температура июля составляет $28,6^{\circ}\text{C}$, а абсолютный максимум достигает $+46^{\circ}\text{C}$, данная задача приобретает особую актуальность.

В районах со среднемесячной температурой июля 21°C и выше нормативная амплитуда колебаний температуры на внутренней поверхности ограждающие конструкции определяется по формуле [5]:

$$A_{\text{тр}}^{\text{сг}} = 2,5 - 0,1 \cdot (t_{\text{ext}} - 21) \quad (6)$$

Для г. Худжанда: $A_{\text{тр}}^{\text{сг}} = 2,5 - 0,1 \cdot (28,6 - 21) = 2,5 - 0,76 = 1,74^{\circ}\text{C}$.

Колебания температуры наружного воздуха вызывают изменение тепловых потоков и температуры на поверхности и в толще ограждения. Эти изменения тоже являются правильными гармоническими колебаниями с периодом [11]. Расчётная амплитуда температурных колебаний на внутренней поверхности определяется как отношение расчётной амплитуды наружного воздуха к коэффициенту затухания ν . Тепловая инерция конструкции D , характеризующая способность ограждения поглощать температурные колебания [5]:

$$D = R_1 S_1 + R_2 S_2 + \dots + R_n S_n \quad (7)$$

где R_i - термическое сопротивление i -го слоя, $\text{м}^2 \cdot ^{\circ}\text{C}/\text{Вт}$; S_i - коэффициент теплоусвоения материала i -го слоя, $\text{Вт}/(\text{м}^2 \cdot ^{\circ}\text{C})$.

Чем выше значение тепловой инерции D , тем эффективнее конструкция погашает суточные колебания наружной температуры. Согласно СНиП РТ 23-02-2021, для зданий в районах со среднемесячной температурой июля выше 21°C значение D должно быть не менее 4 [5].

Коэффициент затухания температурных колебаний ν определяется по формуле, учитывающей термические сопротивления и коэффициенты теплоусвоения всех слоёв

конструкции. При значительной тепловой инерции ($D>7$) амплитуда колебаний на внутренней поверхности уменьшается до пренебрежимо малых значений, что обеспечивает стабильность микроклимата [9, 10].

Контроль влажностного состояния ограждающих конструкций является важнейшим фактором обеспечения их долговечности и теплозащитной эффективности. Увлажнение теплоизоляционного слоя приводит к существенному снижению его термического сопротивления, поскольку коэффициент теплопроводности воды ($0,58 \text{ Вт/(м}\cdot\text{°C)}$) значительно превышает аналогичный показатель для воздуха ($0,026 \text{ Вт/(м}\cdot\text{°C)}$).

Согласно СНиП РТ 23-02-2021, влажностный режим помещений классифицируется на четыре категории в зависимости от температуры и относительной влажности воздуха [5].

Таблица 3 – Классификация влажностных режимов помещений
Table 3 – Classification of indoor humidity regimes

Температура воздуха, °C	Сухой, %	Нормальный, %	Влажный, %	Мокрый, %
до 12	до 60	60–75	свыше 75	—
12–24	до 50	50–60	60–75	свыше 75
свыше 24	до 40	40–50	50–60	свыше 60

Для определения влажностного состояния ограждения необходимо построить эпюры фактического парциального давления водяного пара $e(x)$ и максимального насыщающего давления $E(t)$ по толщине конструкции. Конденсация влаги возникает в зонах, где фактическое давление пара превышает максимальное насыщающее: $e(x)>E(t(x))$. Для предотвращения данного явления следует предусматривать пароизоляционный барьер с внутренней стороны утеплителя [5, 7, 8].

Для практической апробации рассмотренных методик выполнен комплексный теплотехнический расчёт многослойной стеновой конструкции, предназначенной для жилых зданий в климатических условиях г. Худжанда. Конструкция включает пять функциональных слоёв, характеристики которых представлены в таблице 4 и рисунке 1.

Таблица 4 – Физико-технические характеристики слоёв стеновой конструкции

№	Слой конструкции	ρ , кг/м ³	δ , м	λ , Вт/(м·°C)	S , Вт/(м ² ·°C)	R_i , м ² ·°C/Вт	D_i
1	Цементно-песчаный раствор	1800	0,02	0,76	9,60	0,026	0,25
2	Жжённый кирпич	1800	0,25	0,70	9,20	0,357	3,28
3	Минеральная вата	150	0,05	0,045	0,89	1,111	0,99
4	Воздушная прослойка	1,29	0,05	—	—	0,220	—
5	Стеклофибробетон	1850	0,02	0,52	11,09	0,038	0,42
	ИТОГО:		0,39			1,753	4,94

Таблица 5 – Распределение температуры по толщине конструкции (зимний период, г. Худжанд)
Table 5 – Temperature distribution through the thickness of the structure (winter period, Khujand)

Граница слоя	ΣR , м ² ·°C/Вт	τ , °C	$E(t)$, мм рт.ст.	$e(t)$, мм рт.ст.
Внутренняя поверхность	0,115	17,82	11,91	5,95
Кирпич / минвата	0,498	10,53	9,53	5,32
Минвата / воздушная прослойка	1,609	-10,57	1,85	2,13
Воздушная прослойка / стеклофибробетон	1,829	-14,75	1,77	1,61
Наружная поверхность	1,910	-15,0	1,77	1,35

Тепловая инерция конструкции $D=4,94>4$ (норматив) - условие теплоустойчивости выполняется. Нормативная амплитуда колебаний $A_{tr}^{eg}=1,74^\circ\text{C}$. Расчётная амплитуда на внутренней

поверхности $A_t=0,0864^{\circ}\text{C}<1,74^{\circ}\text{C}$. Таким образом, конструкция обеспечивает значительный запас теплоустойчивости.

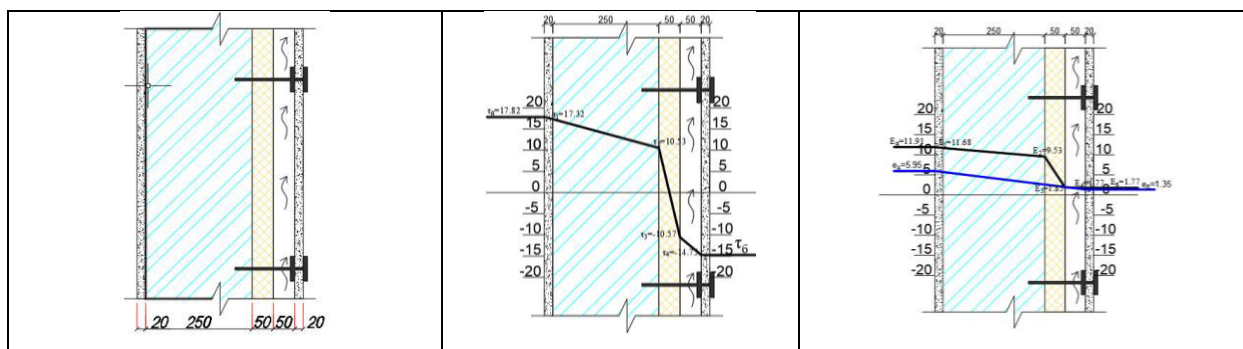


Рисунок 1 - Распределение температуры на поверхности каждой ограждающей конструкции и образование влаги в слоях

Figure 1 – Temperature distribution on the surface of each building envelope and moisture formation in layers

Из данных таблицы 5 и рисунок 1 видно, что в зоне между минеральной ватой и воздушной прослойкой фактическое парциальное давление пара (2,13 мм рт.ст.) приближается к максимальному насыщающему давлению (2,50 мм рт.ст.). Это указывает на потенциальный риск конденсации при понижении наружной температуры ниже расчётной. Для предотвращения данного явления рекомендуется установка пароизоляционного слоя между кирпичной кладкой и минеральной ватой.

Таблица 6 – Сравнительный анализ теплотехнических показателей различных стеновых конструкций для г. Худжанда
Table 6 – Comparative analysis of thermal performance indicators of various wall structures for Khujand

№	Тип конструкции	δ , мм	R_0 , $\text{м}^2\cdot^{\circ}\text{C}/\text{Вт}$	D	Соотв. нормам
1	Кирпичная стена 380 мм без утепления	400	0,72	7,85	Нет
2	Кирпичная стена 250 мм + пенополистирол 50 мм	320	1,62	4,12	Нет ($R_0<1,73$)
3	Газобетон 300 мм + штукатурка	340	1,45	3,20	Нет
4	Кирпич 250 + минвата 50 + возд. просл. + стеклофибробетон	390	1,75	4,94	Да

Результаты сравнительного анализа (таблица 6) показывают, что из четырех рассмотренных конструкций лишь вариант № 4 (кирпичная кладка с минеральной ватой и вентилируемой прослойкой) полностью удовлетворяет нормативным требованиям по обоим показателям - как по сопротивлению теплопередаче ($R_0=1,74>1,73 \text{ м}^2\cdot^{\circ}\text{C}/\text{Вт}$), так и по тепловой инерции ($D=4,94>4$). Конструкции без утепления (вариант №1) и с недостаточной толщиной утеплителя (варианты №2) не удовлетворяют нормативным требованиям для г. Худжанда.

Для климатических условий г. Худжанда, где среднемесячная температура июля достигает $28,6^{\circ}\text{C}$ при абсолютном максимуме $+46^{\circ}\text{C}$, комплекс энергосберегающих мероприятий для снижения перегрева помещений в летний период приобретает особую значимость.

СНиП РТ 23-02-2021 предусматривает следующий комплекс градостроительных и архитектурно-конструктивных мер: применение солнцезащитных устройств на окнах и витражах (козырьки, жалюзи, специальные стёкла с низким коэффициентом пропускания солнечной радиации); рациональная ориентация зданий с учётом требований инсоляции, преобладающего направления ветров и озеленения прилегающей территории; оптимизация объёмно-планировочных решений для организации сквозного проветривания помещений [5].

К конструктивным мероприятиям относятся: устройство вентилируемых воздушных прослоек в наружных стенах толщиной 40-100 мм и в покрытиях толщиной не менее 200 мм; применение солнцезащитных материалов на наружных поверхностях (коэффициент поглощения солнечной радиации $\rho\leq 0,4$); увеличение тепловой инерции ограждений за счёт применения массивных

внутренних слоёв. Исследования показывают, что использование солнцезащитных материалов фасадов позволяет снизить эквивалентную температуру наружной поверхности на 15–20 % по сравнению с тёмными поверхностями [1].

Заключение

Представленные в статье методики теплотехнического расчёта ограждающих конструкций позволяют обоснованно оценить теплозащитные свойства стеновых конструкций как для зимнего, так и для летнего периодов эксплуатации. На основании выполненных расчётов и анализа получены следующие основные результаты:

1. Для климатических условий г. Худжанда значение ГСОП составляет $2107^{\circ}\text{C}\cdot\text{сут.}$, что является наибольшим среди равнинных городов РТ и обуславливает повышенные требования к теплозащите ограждений ($R_{\text{т.эф}}=1,73 \text{ м}^2\cdot^{\circ}\text{C}/\text{Вт}$ для наружных стен).

2. Многослойная конструкция стены, включающая кирпичную кладку (250 мм), минеральную вату (50 мм), вентилируемую воздушную прослойку (50 мм) и стеклофибробетон (20 мм), обеспечивает $R_0=1,75 \text{ м}^2\cdot^{\circ}\text{C}/\text{Вт}$, что превышает нормативное значение на 6,1%.

3. Тепловая инерция рассматриваемой конструкции $D=4,94$ превышает нормативное значение ($D\geq 4$), а расчётная амплитуда колебаний температуры на внутренней поверхности $A_{\text{т}}=0,0864^{\circ}\text{C}$ существенно ниже нормативного значения $A_{\text{т.ег}}=1,74^{\circ}\text{C}$, что гарантирует стабильность микроклимата в летний период.

4. Анализ влажностного режима выявил потенциальный риск конденсации на границе утеплителя и воздушной прослойки. Для предотвращения данного явления рекомендуется установка пароизоляционного барьера перед теплоизоляционным слоем.

5. Сравнительный анализ четырёх типов стеновых конструкций показал, что конструкции без утепления или с недостаточной толщиной утеплителя не удовлетворяют нормативным требованиям СНиП РТ 23-02-2021 для климатических условий г. Худжанда, что подтверждает необходимость применения многослойных ограждений с эффективной теплоизоляцией.

Полученные результаты могут быть использованы при проектировании гражданских зданий в климатических условиях Согдийской области и других районов Республики Таджикистан с аналогичными климатическими характеристиками.

Рецензент: Рахмонзода Я.Дж. – к.т.н., начальник управления науки и инноваций Министерства образования и науки Республики Таджикистан.

Литература

1. Каримов, Н.М. Принципы проектирования гражданских зданий с энергоэффективными ограждающими конструкциями (на примере Таджикистана): дис. ... д-ра PhD. - Душанбе: ТТУ им. акад. М.С. Осими, 2023. - 157 с.
2. Постановление Правительства Республики Таджикистан от 03.08.2002 г. № 318 «Об утверждении Концепции развития топливно-энергетического комплекса РТ на 2003-2015 гг.».
3. Постановление Правительства РТ от 03.08.2002 г. № 318 «Об утверждении комплексной целевой программы по расширенному использованию возобновляемых источников энергии на 2007-2015 гг.».
4. Закон Республики Таджикистан «Об энергосбережении и энергоэффективности» от 19.09.2013 г. № 1018.
5. СНиП РТ 23-02-2021 «Тепловая защита зданий» / Комитет архитектуры и строительства при Правительстве РТ. - Душанбе, 2021. - 51 с.
6. СНиП РТ 23.01-2018 «Строительная климатология» / Комитет архитектуры и строительства при Правительстве РТ. - Душанбе, 2018. - 33 с.
7. ГОСТ 30494-96. Здания жилые и общественные. Параметры микроклимата в помещениях.
8. ГОСТ 26253-2014. Здания и сооружения. Метод определения теплоустойчивости ограждающих конструкций.
9. Богословский В.Н. Строительная теплофизика. - М.: Высшая школа, 1982. - 415 с.
10. Фокин, К.Ф. Строительная теплотехника ограждающих частей зданий. - М.: АВОК-ПРЕСС, 2006. - 256 с.
11. Хасанов, Н.Н. Инженерный метод расчета теплоустойчивости ограждающих конструкций в условиях жаркого климата / Н.Н. Хасанов, Н.М. Каримов, Б.А. Гулямов // Политехнический вестник. Серия: Инженерные исследования. – Душанбе, 2020. – № 3(53). – С. 115–118.
12. Шокиров, Р.М. Повышение теплозащитных качеств наружных стен зданий из легких блоков (на примере Таджикистана) / Р.М. Шокиров, Н.М. Каримов, Н.М. Мухибуллоев // Политехнический вестник. Серия: Инженерные исследования. – Душанбе, 2020. – № 3(53). – С. 133–138.

13. Саид, П. С. Моделсозии математикии конструкцияҳои ихтивоии биноҳои истиқоматӣ дар шароити Ҷумҳурии Тоҷикистон / П. С. Саид, Т. Р. Холмуратов // Фурӯғи илм. – 2026. – No. 1. – P. 91-102. – DOI 10.24412/3078-395X-2026-1-7-91-102. – EDN BTKNO.

References

1. Karimov, N.M. (2023). Principles of designing civil buildings with energy-efficient building envelopes (on the example of Tajikistan) (PhD dissertation). Dushanbe: Tajik Technical University named after Academician M.S. Osimi. 157 p.
2. Resolution of the Government of the Republic of Tajikistan dated August 3, 2002, No. 318 "On approval of the Concept of development of the fuel and energy complex of the Republic of Tajikistan for 2003-2015".
3. Resolution of the Government of the Republic of Tajikistan dated August 3, 2002, No. 318 "On approval of the comprehensive target program on the expanded use of renewable energy sources for 2007-2015".
4. Law of the Republic of Tajikistan "On Energy Saving and Energy Efficiency" dated September 19, 2013, No. 1018.
5. SNiP RT 23-02-2021 "Thermal Performance of Buildings" / Committee for Architecture and Construction under the Government of the Republic of Tajikistan. - Dushanbe, 2021. - 51 p.
6. SNiP RT 23.01-2018 "Construction Climatology" / Committee for Architecture and Construction under the Government of the Republic of Tajikistan. - Dushanbe, 2018. - 33 p.
7. GOST 30494-96. Residential and public buildings. Indoor microclimate parameters.
8. GOST 26253-2014. Buildings and structures. Method for determining the thermal stability of building envelopes.
9. Bogoslovsky, V.N. (1982). Building Thermal Physics. Moscow: Vysshaya Shkola. 415 p.
10. Fokin, K.F. (2006). Building Thermal Engineering of Enclosing Parts of Buildings. Moscow: AVOK-PRESS. 256 p.
11. Khasanov, N.N., Karimov, N.M., & Gulyamov, B.A. (2020). Engineering method for calculating the thermal stability of building envelopes in hot climates. Polytechnic Bulletin. Series: Engineering Research, Dushanbe, No. 3 (53), pp. 115-118.
12. Shokirov, R.M., Karimov, N.M., & Mukhibullov, N.M. (2020). Improving the thermal performance of exterior walls of buildings made of lightweight blocks (on the example of Tajikistan). Polytechnic Bulletin. Series: Engineering Research, Dushanbe, No. 3 (53), pp. 133-138.
13. Said, P.S., & Kholmuratov, T.R. (2026). Mathematical modeling of building envelopes of residential buildings in the conditions of the Republic of Tajikistan. Furugi Ilm, No. 1, pp. 91-102. DOI: 10.24412/3078-395X-2026-1-7-91-102.

МАЪЛУМОТ ДАР БОРАИ МУАЛЛИФОН — СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ — INFORMATION ABOUT AUTHORS

TJ	RU	EN
Каримов Насимҷон Мирзораҳимович	Каримов Насимджон Мирзорахимович	Karimov Nasimjon Mirzorahimovich
Доктор PhD, муаллими калон	Доктор PhD, ст.	Doctor. PhD., senior lecture
Донишгоҳи техникии Тоҷикистон ба номи акад. М.С. Осимӣ	Таджикский технический университет им. ак. М.С. Осими	Tajik Technical University named after ac. M.S. Osimi
Email: nasim_2_4@mail.ru		
TJ	RU	EN
Қаландаров Диловаршох Файзуддинович	Каландаров Диловаршох Файзуддинович	Dilovarshoh Fayzuddinovich Kalandarov
докторант	докторант	Doctor PhD
Донишгоҳи техникии Тоҷикистон ба номи ак. М.С. Осимӣ	Таджикский технический университет им. ак. М.С. Осими	Tajik Technical University named after ac. M.S. Osimi
Email: dkalandarov48@gmail.com		
TJ	RU	EN
Шарифов Мирзобаходур Хабибович	Шарифов Мирзобаходур Хабибович	Sharifov Mirzobahodur Habibovich
магистрант	магистрант	Master degree
Донишгоҳи техникии Тоҷикистон ба номи ак. М.С. Осимӣ	Таджикский технический университет им. ак. М.С. Осими	Tajik Technical University named after ac. M.S. Osimi

ВЛИЯНИЕ ЧЕТЫРЕХКОМПОНЕНТНЫХ ЦЕМЕНТОВ НА ФИЗИКО-МЕХАНИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА БЕТОНА

А.А. Акрамов

Таджикский технический университет имени академика М.С. Осими, г. Душанбе, Республика Таджикистан

В работе исследовано влияние состава и granulometрии минеральных добавок на прочностные характеристики четырёхкомпонентных цементных систем с 50 % замещения клинкера. Проанализированы свойства золы-уноса Душанбинской ТЭЦ-2, доменного шлака и известняков месторождений Пусиён и Харангон - в том числе их фазовый состав, плотность, удельная поверхность и распределение частиц по размерам. Изучено взаимодействие компонентов в многокомпонентных вяжущих: показано, что зола-унос замедляет ранний набор прочности, а тонкомолотый известняк выступает катализатором твердения на начальных этапах, при этом совместное применение добавок позволяет реализовать синергетический эффект. Определены закономерности изменения водопотребности цементных смесей: установлено, что рост доли золы-уноса снижает суммарную удельную поверхность системы, но повышает водопотребность из-за угловатой формы частиц и открытой пористости. Выявлено, что динамика прочности при сжатии существенно зависит от сроков твердения и соотношения компонентов: на ранних этапах (1–2 суток) преимущество имеют составы с повышенным содержанием известняка, а в поздние сроки (28–56 суток) ключевую роль играет зольный компонент, особенно в смесях с 20 % шлака. Сформированы оптимизированные granulометрические составы вяжущих за счёт селективного помола компонентов: доменный шлак доводили до сверхтонкого помола (8000 см²/г), известняк ограничивали 20 минутами помола для сохранения грубой фракции, золу-унос использовали без дополнительной обработки. Представлены результаты механических испытаний: в оптимизированных составах к 28 суткам прочность при сжатии достигала 45–52 МПа (для 20 % шлака) и порядка 54 МПа (для 30 % шлака), что свидетельствует о приросте прочности на 10–18 % по сравнению с исходными образцами. Установлено, что предложенный подход позволяет сохранить нормальную плотность цементного теста на исходном уровне (27,5–29,5 %) при значительном повышении прочностных показателей. Обоснована роль поровой структуры в эксплуатационных свойствах бетона: по данным ртутной порометрии, во всех оптимизированных составах наблюдается низкая капиллярная пористость с пиком распределения в районе 0,5 мкм, а при высокой доле золы максимум смещается в область более мелких пор. Результаты демонстрируют потенциал регулирования фракционного состава минеральных добавок для повышения эффективности многокомпонентных цементов, хотя промышленная реализация сверхтонкого помола шлака на текущем этапе остаётся экономически нецелесообразной.

Ключевые слова: композиционные цементы, клинкер, шлак, зола-унос, известняк, прочность, удельная поверхность.

ТАЪСИРИ СЕМЕНТҲОИ ЧОРҚУЗЪА (ЧОРКОМПОНЕНТА) БА ХОСИЯТҲОИ ФИЗИКИЮ МЕХАНИКИИ БЕТОН

А.А. Акрамов

Донишгоҳи техникии Тоҷикистон ба номи академик М.С. Осимӣ, ш. Душанбе, Ҷумҳурии Тоҷикистон

Корҳо оид ба оптимизатсияи афзоиши устувории маводҳои пайвастандаи омехта, ки аз чор қузъ: клинкери портландсементӣ (50 %), шлаки домнагӣ, хокистар-кул (зола-унос) ва орди оҳаксанг иборатанд, гузаронида шуданд. Таваассути танзими таркиби донагии маводҳои ибтидоӣ ба беҳтар намудани нишондиҳандаҳои устуворӣ даст ёфта шуд. Натиҷаҳои беҳтарин дар таркибҳои дорои 30 фоиз шлак ба қайд гирифта шудаанд, ки дар онҳо афзоиши устуворӣ дар шабонарӯзи 28-ум то 18 %-ро ташкил дод ва ин аз нишондиҳандаҳои намунаҳои дорои 20 % шлак болотар аст. Бо вучуди ин, усули пешниҳодшудаи оптимизатсия ҳоло хусусияти назариявӣ (гипотетикӣ) дорад, зеро ба даст овардани шлаки ниҳоят майда (баланддисперсӣ) бо усулҳои муосири суфтакунӣ ва сепаратсия аз ҷиҳати иқтисодӣ номувофиқ дониста шуд.

Калидвожаҳо: сементҳои композитсионӣ, клинкер, шлак, хокистар-кул, оҳаксанг, устуворӣ, сатҳи хос.

EFFECTS OF QUATERNARY CEMENTS ON THE PHYSICO-MECHANICAL PROPERTIES OF CONCRETE

А.А. Akramov

Tajik Technical University named after Academician M.S. Osimi, Dushanbe, Republic of Tajikistan

This paper examines the influence of the composition and granulometry of mineral additives on the strength properties of four-component cement systems with 50% clinker substitution. The properties of fly ash from Dushanbe CHPP-2, blast furnace slag, and limestone from the Pusiyaon and Kharangon deposits were analyzed, including their phase composition, density, specific surface area, and particle size distribution. The interactions between components in multicomponent binders were studied: it was shown that fly ash slows early strength gain, while finely ground limestone acts as a catalyst for hardening in the initial stages. The combined use of additives enables a synergistic effect. Patterns in changes in the water demand of cement mixtures were determined: it was found that an increase in the proportion of fly ash reduces the total specific surface area of the system but increases water demand due to the angular shape of the particles and open porosity. It was found that the dynamics of compressive

strength depend significantly on the curing time and component ratio: in the early stages (1–2 days), compositions with a higher limestone content are preferable, while in the later stages (28–56 days), the ash component plays a key role, especially in mixtures with 20% slag. Optimized binder particle size distributions were developed through selective grinding of the components: blast furnace slag was ground to an ultrafine grinding ($8000 \text{ cm}^2/\text{g}$), limestone was ground for a limited time of 20 minutes to preserve the coarse fraction, and fly ash was used without additional processing. The results of mechanical tests are presented: in the optimized compositions, by 28 days, the compressive strength reached 45–52 MPa (for 20% slag) and approximately 54 MPa (for 30% slag), indicating a strength increase of 10–18% compared to the original samples. It was found that the proposed approach allows for maintaining the normal consistency of the cement paste at the initial level (27.5–29.5%) while significantly increasing strength properties. The role of pore structure in the performance properties of concrete is substantiated: according to mercury porosimetry, all optimized compositions exhibit low capillary porosity with a distribution peak near $0.5 \text{ }\mu\text{m}$, and at a high ash proportion, the maximum shifts to the region of smaller pores. The results demonstrate the potential for regulating the fractional composition of mineral additives to improve the efficiency of multicomponent cements, although the industrial implementation of ultrafine slag grinding currently remains economically impractical.

Keywords: composite cements, clinker, slag, fly ash, limestone, strength, specific surface area.

Введение

Основным источником золы-уноса и золошлаковых отходов в Республике Таджикистан являются крупные теплоэлектроцентрали, работающие на угле. В силу модернизации энергетики за последние 10–15 лет объемы доступной золы существенно выросли.

Душанбинская ТЭЦ-2 – это самый мощный и современный объект (400 МВт), работающий на твердом топливе (уголь Шурабского и Фон-Ягнобского месторождений). ТЭЦ генерирует сотни тысяч тонн золошлаковых отходов в год. На станции установлены современные тканевые и электрофильтры, что позволяет улавливать высокодисперсную золу-уноса сухого отбора. Эта зола активно тестируется и частично уже используется местными цементными заводами (например, ООО «Хуаксин Гаюр Цемент») в качестве активной минеральной добавки.

Поскольку ТЭЦ Таджикистана используют преимущественно таджикский каменный и бурый уголь, получаемая зола часто относится к антрацитовым или каменноугольным (класс F) либо буроугольным (класс C). Она обладает выраженными пуццолановыми свойствами, что позволяет заменять ею до 15 – 30 % клинкера в цементе или использовать как наполнитель для бетона, повышающий его плотность и сульфатостойкость.

Процесс изготовления одной тонны цементного клинкера сопровождается выделением приблизительно 0,53 т углекислого газа, что обусловлено химическим распадом известняка [1]. Дополнительный объем эмиссии CO_2 генерируется в результате сжигания технологического топлива. Этот прогресс стал возможен благодаря двум основным факторам: переход на альтернативные виды топлива и активное внедрение цементно-замещающих материалов (ЦЗМ). В качестве наиболее распространенных добавок, заменяющих клинкер, выступают: молотый гранулированный доменный шлак (ГДШ), зола-унос и тонкомолотый известняк. Высокая степень замещения клинкера лишь одним типом ЦЗМ нередко приводит к нежелательным последствиям – замедлению темпов набора прочности бетона или снижению его эксплуатационной стойкости (долговечности). В составе современных многокомпонентных цементов каждый отдельный вид добавки оказывает специфическое воздействие на итоговые технические характеристики материала, что требует дифференцированного подхода к их дозированию.

Взаимодействие летучей золы и известняка наглядно демонстрирует специфику формирования прочностных характеристик бетона. На разных этапах твердения эти добавки проявляют себя следующим образом: зола-уноса как правило, провоцирует замедление набора прочности многокомпонентных составов на начальных этапах [3], однако при достижении проектного возраста итоговые показатели остаются стабильно высокими а тонкомолотый известняк напротив, выступает катализатором твердения в ранние сроки [4], но его избыточное содержание может негативно сказаться на прочности материала в долгосрочной перспективе. Интеграция нескольких видов цементно-замещающих материалов (ЦЗМ) позволяет достичь баланса технических характеристик. Сочетание различных добавок дает возможность, во-первых, нивелировать недостатки отдельных компонентов за счет достоинств других, во-вторых, использовать синергетический эффект, возникающий при их взаимодействии. В системах, объединяющих золу-унос и молотый известняк, наблюдается образование карбоалюминатов [5].

Это химическое взаимодействие способствует оптимизации микроструктуры цементного камня и улучшению его эксплуатационных свойств.

В исследовании использовали известняк месторождения Пусиён (Яванский район), который обеспечивает мощный завод «Хуасин Гаюр Цемент» (один из крупнейших производителей в стране, в настоящее время). Известняки характеризуются стабильным химическим составом.

Раньше использовался известняк Харангонского месторождения (Варзобский район), расположенного в непосредственной близости к Душанбе. Оно являлось основной сырьевой базой для Душанбинского цементного завода («Таджикцемент»). Известняки здесь высокого качества, с высоким содержанием CaCO_3 , пригодные для производства портландцемента высших марок.

Настоящее исследование направлено на поиск путей оптимизации набора прочности четырехкомпонентными цементными системами. В составе данных вяжущих доля замещения клинкера достигает 50 % за счет использования измельченного известняка, золы-уноса и доменного шлака. Работа проводится в рамках комплексного изучения факторов, определяющих показатели долговечности подобных составов.

Материалы и методы исследования

В работе были использованы портландцемент марки ПЦ 500 ДО / ЦЕМ I 42,5 заводы компании ООО «Хуасин Гаюр Цемент», зола-унос Душанбинского ТЭЦ-2 и известняк месторождения Пусиён (Яванский район, Хатлонская область), а также известняк Харангонского месторождения (Варзобский район). Исследование бетонных образцов кубиков $10 \times 10 \times 10$ см проводилось в лаборатории ГУП НИИ «Строительство и архитектура».

Для получения гранулометрической кривой использовали прибор - лазерную дифракцию Analysette 22 (Fritsch) в лаборатории ГУП НИИ «Строительство и архитектура».

Методика получения гранулометрического кривого ОПЦ, ГДШ, известняка и золы-уноса заключается в следующем:

1. Проба суспензируется в жидкой среде (мокрый способ, обычно в спирте для цемента, чтобы избежать гидратации) или диспергируется потоком сжатого воздуха (сухой способ).
2. Лазерный луч проходит сквозь поток частиц. Частицы рассеивают свет под разными углами: крупные – под малыми углами с высокой интенсивностью, мелкие – под большими углами.
3. Оптические детекторы фиксируют угловое распределение интенсивности рассеянного света.

4. Программное обеспечение на основе теории Ми или приближения Фраунгофера рассчитывает эквивалентные диаметры частиц и автоматически строит интегральные и дифференциальные гранулометрические кривые.

Начальная стадия исследования включала анализ одиннадцати комбинаций четырехкомпонентного цемента (см. табл. 1). Роль клинкерной составляющей выполнял портландцемент марки ПЦ 500 ДО / ЦЕМ I 42,5, в составе которого уже присутствовали присадка-ускоритель и малая доля известняка. С целью стандартизации уровня SO_3 на отметке 3 % масс. в смесь добавляли ангидрит. Чтобы исключить влияние физических факторов на результаты, гранулометрия шлака, золы-уноса и известняковой составляющей подбиралась максимально идентичной – это позволило связать динамику прочности и гидратации исключительно с химическим составом вяжущего.

Характеристики компонентов приведены в табл. 2 и 3 и на рис. 1.

Таблица 1 – Составы четырехкомпонентных цементов, содержащих 50 масс. % ОПЦ

Table 1 – Compositions of quaternary cements containing 50 wt. % OPC

Компонент	Содержание, масс. %										
ГДШ	20	20	20	20	20	20	30	30	30	30	30
Зола-унос	0	10	15	20	25	30	0	5	10	15	20
Известняк	30	20	15	10	5	0	20	15	10	5	0

Таблица 2 – Фазовый состав основных компонентов

Table 2 – Phase composition of the major components

Фаза (ОПЦ)	ОПЦ, %	Фаза (Добавки)	ГДШ, %	Зола-унос, %	Известняк, %
C ₃ S	68,2	Кальцит	1,7	0,9	95,6
C ₂ S	7,1	Кварц	0,2	14,3	0,9
C ₃ A	5,1	Майенит	0,2		
C ₄ AF	11,4	Мервинит	0,7		
Бассанит	1	Муллит		11,4	
Гипс	3,1	Маггемит		0,8	
CaO _{св}	0,6	Гематит		0,6	
Периклаз	0,6	Аморфная фаза	94,1	72	3,5
Портландит	0,8	C ₃ S	2		
Арканит	0,8	C ₄ AF	0,3		
Кальцит	1,3	Гипс	0,8		
Итого	100	Итого	100	100	100

Таблица 3 – Физические свойства основных компонентов

Table 3 – Physical properties of the major components

Материал	Удельная поверхность по Блейну, см ² /г	Плотность, г/см ³	d ₅₀ , мкм
ОПЦ	5210	3,142	8,73
ГДШ	4130	2,896	13,55
Зола-унос	4170	2,491	11,38
Известняк	5190	2,722	9,03

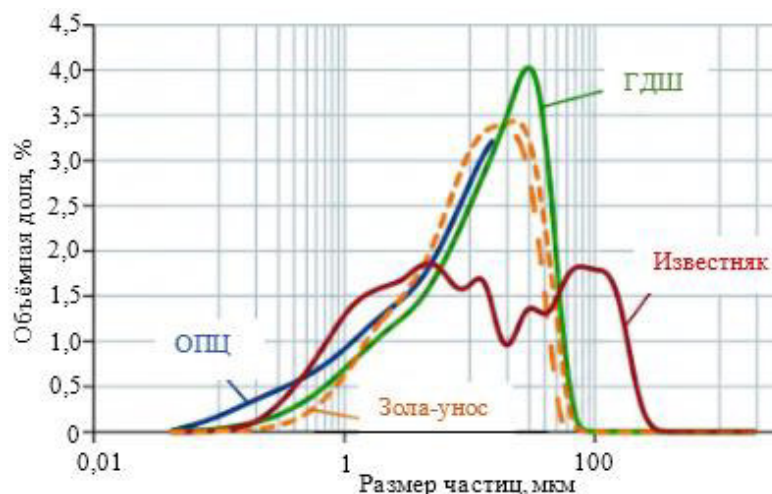


Рисунок 1 – Гранулометрические кривые для основных компонентов

Figure 1 – Particle size distribution curves of the major components

В исследуемом шлаке было зафиксировано присутствие небольшого количества клинкерных минералов, что объясняется условиями его подготовки (сушкой) на территории цементного предприятия. При подготовке смесей зола-унос применялась в молотом состоянии. Согласно заданным условиям эксперимента, зерновые составы ОПЦ, золы и шлака оказались сопоставимыми.

В то же время измельчение известняка в шаровой мельнице обусловило бимодальный характер распределения его частиц. Для полученных четырехкомпонентных составов были установлены базовые характеристики: динамика набора прочности, величина удельной поверхности и нормальная густота (водопотребность).

Доменный шлак подвергался измельчению в шаровой мельнице в течение 6 часов, и была достигнута целевая тонкость помола – $8000 \text{ см}^2/\text{г}$, что превышает минимально необходимый порог в $6000 \text{ см}^2/\text{г}$. Это показатель сверхтонкого (коллоидного) помола. За счет колоссальной площади поверхности 8000 см^2 на каждый грамм шлак вступает в химическую реакцию гидратации в первые же сутки, обеспечивая высокую раннюю прочность бетона (компенсируя главный недостаток обычных шлакобетонов – их медленное твердение).

Частицы такой крупности работают как ультрадисперсный наполнитель. Они распределяются в микропорах между зернами цемента и песка, заклинивая их. Это делает структуру цементного камня практически беспористой, что автоматически повышает водонепроницаемость, морозостойкость и конечную прочность бетона.

Результаты и обсуждения

На рис. 2 приведены значения удельной поверхности и водопотребности четырехкомпонентных цементов.

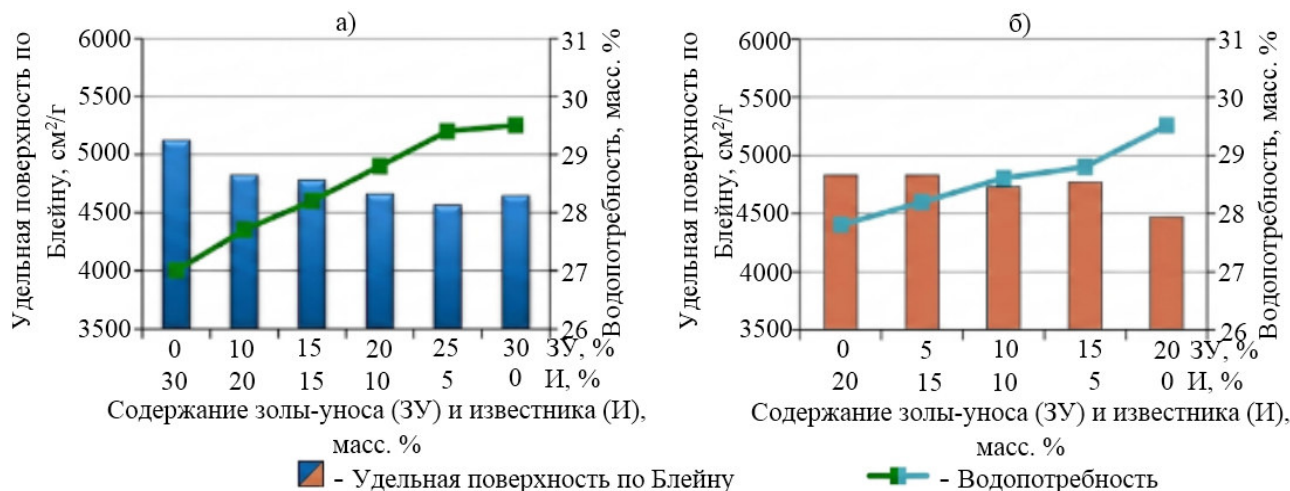


Рисунок 2 – Удельная поверхность по Блейну и водопотребность цементов с 20 (а) и 30 масс. % ГДШ (б)
Figure 2 – Blaine specific surface area and water demand of cements containing 20 wt. % (a) and 30 wt. % (b) of GBFS

Рост концентрации золы-уноса ведет к снижению удельной поверхности цементных систем, что обусловлено более низкой дисперсностью данного компонента ($4170 \text{ см}^2/\text{г}$ по Блейну) в сравнении с известняковым наполнителем ($5190 \text{ см}^2/\text{г}$). Вопреки снижению суммарной поверхности, наблюдается существенное повышение водопотребности. Данный эффект может быть вызван высокой концентрацией частиц угловатой формы, сформировавшихся при помоле золы (рис. 3, а), а также ростом открытой пористости вследствие разрушения полых микросфер (рис. 3, б). Дополнительным фактором выступает плотность упаковки: составы с преобладанием известняка характеризуются более плотной структурой за счет бимодального распределения его частиц по размерам.

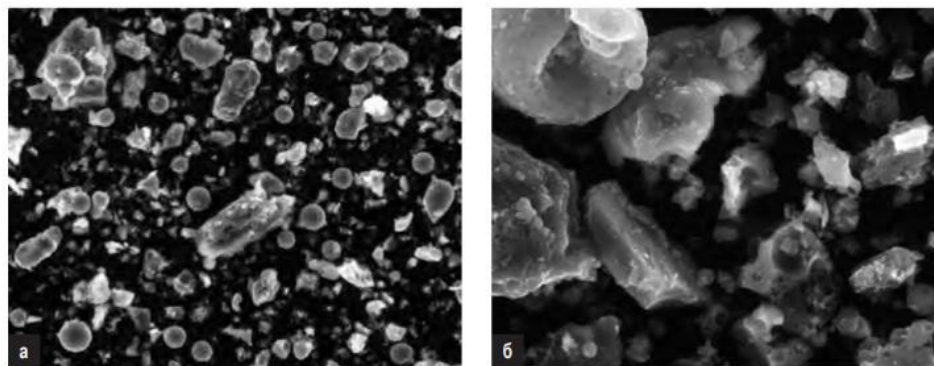


Рисунок 3 – Сферические и угловатые частицы (а) и грубые частицы с открытой пористостью (б) в измельченной золе-уносе
Figure 3 – Spherical and Angular Particles (a) and Coarse Particles with Open Porosity (b) in Ground Fly Ash

Графическая интерпретация процесса набора прочности при сжатии для составов, содержащих 20 % и 30 % шлака по массе, приведена на рис. 4. Данные показатели были получены в ходе испытаний стандартных растворов с водоцементным отношением, равным 0,50, согласно методике, описанной в источнике.

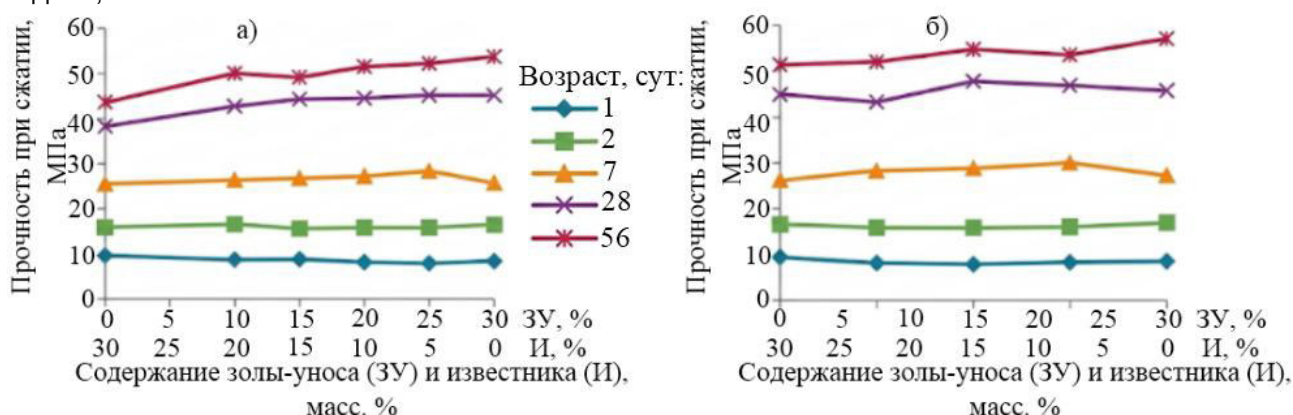


Рисунок 4 – Прочность при сжатии для композиций с 20 (а) и 30 (б) масс. % шлака
Figure 4 – Compressive Strength of Compositions Containing 20 wt.% (a) and 30 wt.% (b) Slag

На ранних сроках твердения (1 сутка) максимальные показатели прочности при сжатии зафиксированы у образцов с повышенной долей известнякового компонента. Это объясняется как каталитическим действием известняка, так и минимальным присутствием (или полным отсутствием) золы-уноса, замедляющей гидратацию на начальном этапе. К 2-м и 7-м суткам существенной зависимости прочности от рецептуры вяжущего не обнаружено. Однако в период 28–56 суток зольный компонент начинает играть ключевую роль в упрочнении, особенно в смесях с 20-процентным содержанием шлака.

Увеличение доли шлака до 30 % также способствует росту прочностных характеристик, проявляющемуся с 7-суточного возраста и усиливающемуся в более поздние сроки. Тем не менее общие показатели прочности остались сравнительно невысокими, составив 39 – 47 МПа к 28 суткам.

С целью совершенствования динамики набора прочности и эксплуатационной стойкости четырехкомпонентных вяжущих были определены две стратегии, также направленные на минимизацию негативного влияния отклонений от оптимальных режимов твердения. Первая стратегия базировалась на направленном регулировании гранулометрического состава каждого из компонентов для обеспечения быстрого твердения без существенного роста водопотребности. Вторая – на интенсификации процессов гидратации минеральных добавок (золы и шлака) посредством химического воздействия. В данном материале изложены итоги реализации исключительно первого метода, так как изыскания в рамках второго подхода на текущий момент продолжаются.

Ключевая задача регулирования зернового состава состояла в доведении вспомогательных цементирующих материалов (ВЦМ) до заданных показателей дисперсности, минуя измельчение клинкерной составляющей. Такой подход позволяет максимально эффективно задействовать реакционную способность добавок. По итогам предварительной серии экспериментов были установлены следующие условия:

1) Доменный шлак, учитывая его доминирующее влияние на динамику набора прочности, подвергался интенсивному измельчению. В шаровой мельнице в течение 6 часов была достигнута целевая тонкость помола – 8000 см²/г, что превышает минимально необходимый порог в 6000 см²/г.

2) Зола-унос, данный наполнитель применялся в исходном состоянии, без дополнительной обработки. Это необходимо для балансировки высокой дисперсности других фаз (шлака и клинкера). Кроме того, округлая морфология зольных частиц была использована для оптимизации реологических свойств и снижения водопотребности готовой смеси.

Для достижения баланса в гранулометрии четырехкомпонентного вяжущего и уменьшения его потребности в воде, наиболее химически пассивный ингредиент – известняк, который должен обладать максимально возможной крупностью зерен. С этой целью время его обработки в шаровой мельнице было ограничено 20 минутами. Одновременно с этим концентрация SO₃ в составе цемента была скорректирована в сторону уменьшения до 2,5 % по массе. Итоговые

гранулометрические показатели и физико-механические параметры модифицированных компонентов отображены в таблице 4 и на рисунке 5.

Таблица 4 – Физические свойства основных компонентов цемента

Table 4 – Physical Properties of the Main Cement Components

Материал	Удельная поверхность по Блейну, $\text{см}^2/\text{г}$	Плотность, $\text{г}/\text{см}^3$	d_{50} , мкм
ОПЦ	5180	3,128	9
ГДШ	7710	2,893	2,4
Зола-унос	3340	2,323	19,4
Известняк	3590	2,718	14,2

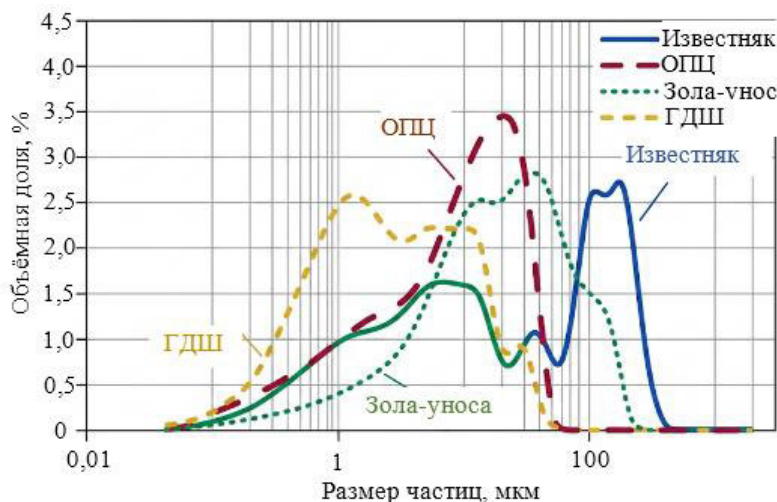


Рисунок 5 – Оптимизированное распределение частиц ингредиентов

Figure 5 – Optimized Particle Size Distribution of the Ingredients

Представленные на рис. 5 данные свидетельствуют о том, что четырехкомпонентное вяжущее характеризуется расширенным диапазоном размеров частиц.

Расчет удельной поверхности исследуемых смесей производился исходя из индивидуальных показателей дисперсности каждого базового компонента. Взаимосвязь между водопотребностью и удельной поверхностью данных цементных систем наглядно отражена на рис. 6.

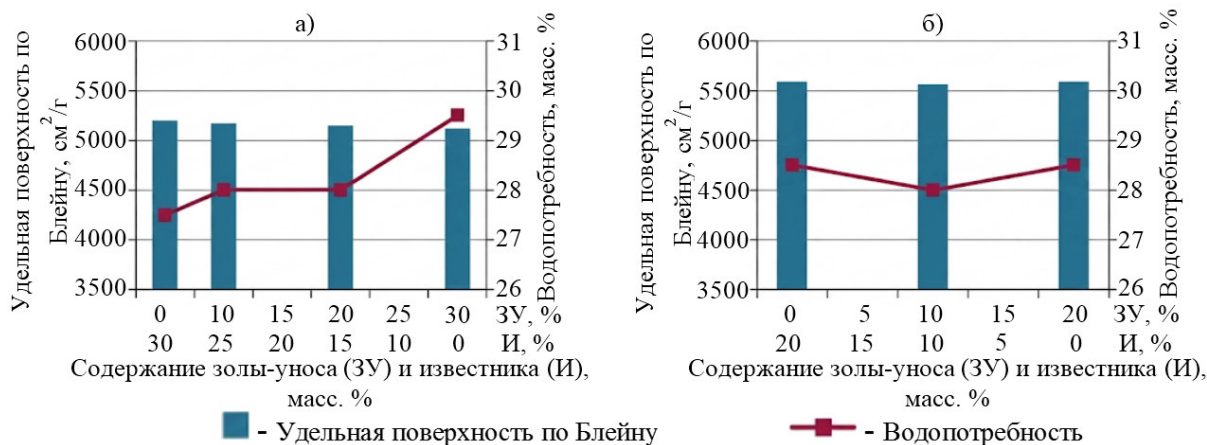


Рисунок 6 – Показатели дисперсности по Блейну и нормальной густоты четырехкомпонентных вяжущих, содержащих 20 % (а) и 30 % (б) ГДШ по массе

Figure 6 – Blaine Fineness and Standard Consistency of Four-Component Binders Containing 20 wt.% (a) and 30 wt.% (b) Ground Granulated Blast Furnace Slag (GGBFS)

Так как удельная поверхность зольного компонента и известнякового наполнителя практически идентична, итоговая дисперсность всей системы варьируется преимущественно за счет изменения доли шлака. Зафиксированные показатели водопотребности в большинстве случаев варьируются в пределах 27,5 – 28,5 %. Лишь в единичном случае этот параметр вырос до 29,5 %. Это подтверждает, что, несмотря на рост удельной поверхности, оптимизированные составы сохраняют потребность в воде на уровне исходных (неоптимизированных) образцов.

На рис. 7 отражены результаты испытаний на сжатие для оптимизированных систем с содержанием шлака 20 % и 30 %, полученные при испытании стандартных растворов ($B/C = 0,50$) по методике . Для наглядного сопоставления эффективности на этом же графике представлены прочностные характеристики цементов до оптимизации.

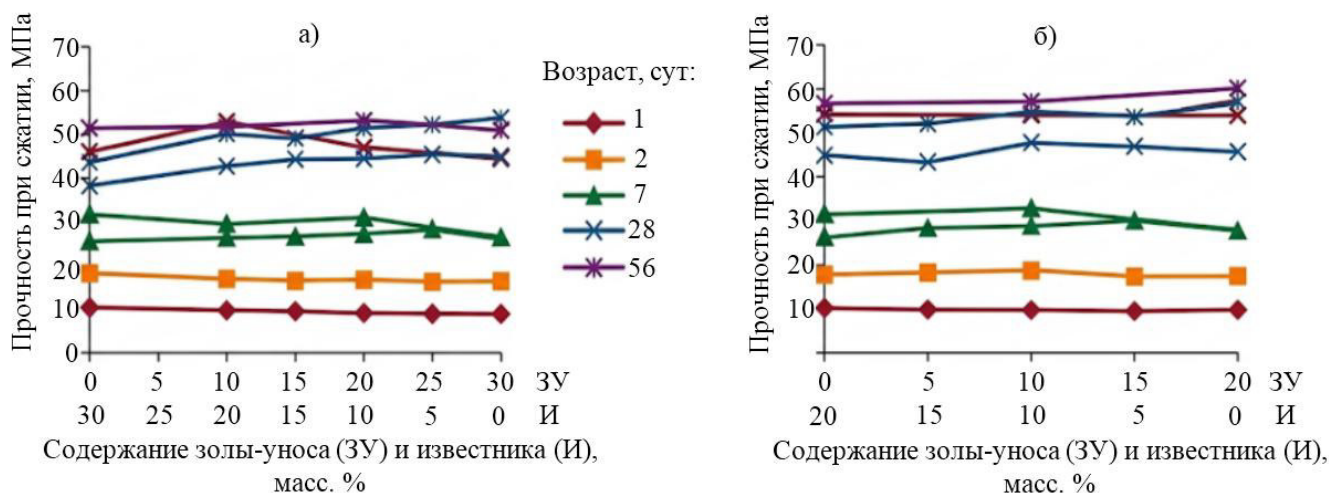


Рисунок 7 – Динамика сопротивления сжатию для составов с 20 % (а) и 30 % (б) шлака. Штриховыми линиями обозначены показатели прочности исходных (неоптимизированных) цементов

Figure 7 – Development of Compressive Strength for Compositions Containing 20 wt.% (a) and 30 wt.% (b) Slag. Dashed Lines Indicate the Strength Values of the Original (Non-Optimized) Cements

На начальных этапах твердения (1–2 суток) у модифицированных цементов с 20 – процентным содержанием шлака наблюдался лишь умеренный прирост прочностных характеристик. Однако к 7 и 28 суткам зафиксировано существенное повышение прочности, за исключением рецептуры с 30 % золы. К 28 – дневному возрасту предел прочности при сжатии достиг интервала 45 – 52 МПа (при этом показатель 52 МПа, скорее всего, является статистической погрешностью).

К 56 суткам темпы упрочнения замедлились, что свидетельствует о завершении основной фазы гидратации шлака в более ранние сроки. Отсутствие положительной динамики прочности при высокой концентрации золы-уноса (30 %), наблюдаемое на всех этапах исследования, может объясняться конкурентным взаимодействием между зольным и шлаковым компонентами.

Композиции с 30 масс. % шлака демонстрируют примерно те же тенденции, что и композиции с 20 масс. % шлака. Как и предполагалось, увеличение прочности в случае 30 масс. % шлака оказалось более выраженным. Уже в возрасте 1 и 2 сут прочность при сжатии заметно возросла. В возрасте 28 сут она достигла приблизительно 54 МПа.

Распределение пор по размерам в выборочных образцах определяли с помощью ртутной порометрии (рис. 8) с использованием образцов 28 – суточного возраста после определения прочности при сжатии.

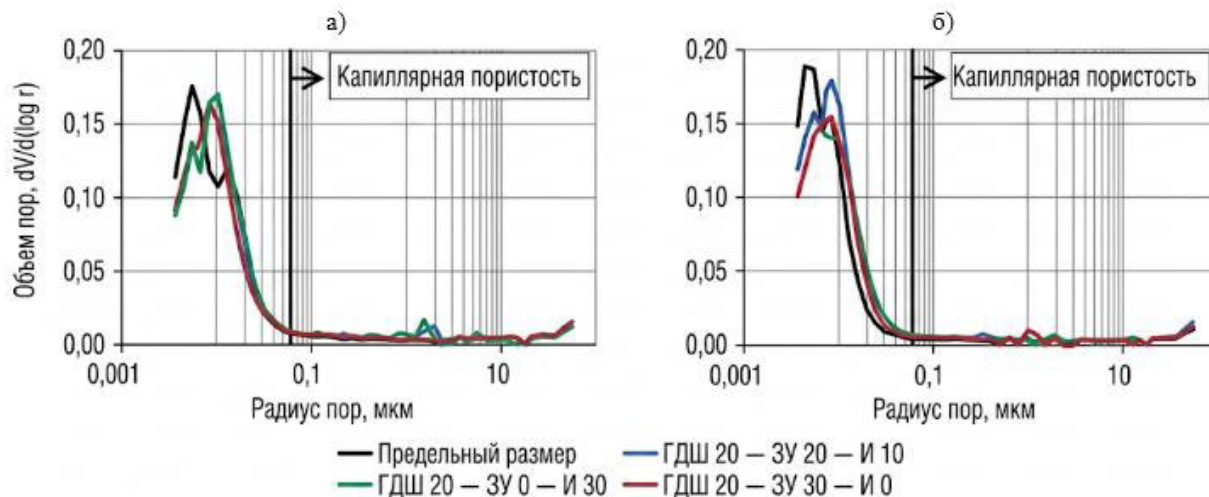


Рисунок 8 – Дифференциальные кривые распределения пор в логарифмических координатах для составов с содержанием шлака 20 % (а) и 30 % (б) по массе

Figure 8 – Differential Pore Size Distribution Curves in Logarithmic Coordinates for Compositions Containing 20 wt.% (a) and 30 wt.% (b) Slag

Для всех растворов на базе цементов с 20 – процентным содержанием шлака характерна идентичная и при этом низкая капиллярная пористость. Пик распределения пор сосредоточен в районе 0,5 мкм и почти не коррелирует с вариациями в рецептуре. Однако при предельной дозировке золы-уноса (состав ГДШ – 20, ЗУ – 30, И – 0) наблюдается сдвиг этого максимума в область более мелких пор.

Аналогичные закономерности с небольшими уточнениями прослеживаются и для смесей с 30 % шлака. В сравнении с 20 – процентными составами здесь отмечается незначительное уменьшение объема капиллярных пор. При этом рост концентрации золы-уноса провоцирует еще более выраженное смещение пика распределения в сторону меньших диаметров.

Выводы

Настоящая работа посвящена поиску путей ускорения набора прочности четырехкомпонентных цементных систем (содержание клинкера – 50 %) посредством регулирования фракционного состава их ингредиентов: золы-уноса, доменного шлака и известняка.

Методология исследования опиралась на селективный подбор дисперсности минеральных добавок, что позволило максимально раскрыть их реакционную способность, не допуская при этом критического роста водопотребности. Требуемое распределение частиц в оптимизированных составах достигалось за счет сочетания тонкомолотого шлака с грубодисперсным известняком и золой-уносом в состоянии поставки (без обработки). Такая комбинация позволила сохранить нормальную густоту цементного теста на исходном уровне при существенном увеличении прочности на сжатие в интервале от 7 до 56 суток. Наиболее выраженная динамика упрочнения зафиксирована у образцов с 30 % шлака (прирост около 18 % к 28 суткам), в то время как при 20-процентном содержании шлака этот показатель составил порядка 10 %.

Однако стоит отметить, что предложенная концепция пока носит преимущественно теоретический характер. Это связано с тем, что получение высокодисперсного шлака с применением современных промышленных методов помола и классификации на данный момент экономически нецелесообразно.

Рецензент: Хасанзода Н.М. — д.т.н., и.о. профессора кафедры «Основания, фундаменты и подземные сооружения» ЛПТУ им. акад. М. Осими.

Литература

1. Damtoft, J.S. Sustainable Development and Climate Change Initiatives / J.S. Damtoft et al. // Cement and Concrete Research. – 2008. – Vol. 38. – No. 2. – P. 115–127.

2. VDZ. Verminderung der CO₂-Emissionen. Beitrag der deutschen Zementindustrie. Verein deutscher Zementwerke e.V., 2013.

3. Абдуганиев, А. М. Применение углеотходов при сухом способе производства цемента / А. М. Абдуганиев, А. А. Акрамов, М. З. Сиддигов // Наука-основа инновационного развития: Материалы X Международной научно-практической конференции, Душанбе, 17–18 апреля 2025 года. – Душанбе: Таджикский технический университет им. акад. М.С. Осими, 2025. – С. 138-141. – EDN MYSQVP.

4. Сатторов, З. М. Влияние углеродсодержащих примесей на процесс разложения каолинита / З. М. Сатторов, А. А. Акрамов // Наука-основа инновационного развития: Материалы X Международной научно-практической конференции, Душанбе, 17–18 апреля 2025 года. – Душанбе: Таджикский технический университет им. акад. М.С. Осими, 2025. – С. 146-148. – EDN EGOUFQ.

5. Саидзода, Д. Х. Сульфатирование высокоосновного ферритного клинкера на основе ферритного отхода / Д. Х. Саидзода, А. А. Акрамов, М. Р. Джуракулов // Политехнический вестник. Серия: Инженерные исследования. – 2025. – № 1(69). – С. 128-133. – EDN KIPTPO.

References

1. Damtoft, J.S. Sustainable Development and Climate Change Initiatives / J.S. Damtoft et al. // Cement and Concrete Research. – 2008. – Vol. 38. – No. 2. – P. 115–127.

2. VDZ (Verein Deutscher Zementwerke e.V.). Verminderung der CO₂-Emissionen: Beitrag der deutschen Zementindustrie. Düsseldorf, Germany: Verein Deutscher Zementwerke e.V., 2013.

3. Abduganiev, A.M., Akramov, A.A., Siddikov, M.Z. Application of Coal Waste in the Dry Process of Cement Production. In: Proceedings of the 10th International Scientific and Practical Conference "Science as the Basis of Innovative Development", Dushanbe, Tajikistan, April 17–18, 2025. Dushanbe: Tajik Technical University named after Academician M.S. Osimi, 2025, pp. 138–141.

4. Sattorov, Z.M., Akramov, A.A. Influence of Carbon-Containing Impurities on the Kaolinite Decomposition Process. In: Proceedings of the 10th International Scientific and Practical Conference "Science as the Basis of Innovative Development", Dushanbe, Tajikistan, April 17–18, 2025. Dushanbe: Tajik Technical University named after Academician M.S. Osimi, 2025, pp. 146–148.

5. Saidzoda, D.Kh., Akramov, A.A., Dzhurakulov, M.R. Sulfation of High-Basic Ferrite Clinker Based on Ferrite Waste. Polytechnic Bulletin. Series: Engineering Research. 2025, 1(69), 128–133.

МАЪЛУМОТ ДАР БОРАИ МУАЛЛИФ-СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРЕ-INFORMATION ABOUT AUTHOR

TJ	RU	EN
Акрамов Авазҷон Абдуллоевич	Акрамов Авазжон Абдуллоевич	Akramov Avazjon Abdulloevich
Номзади илмҳои техникӣ, дотсент	Кандидат технических наук, доцент	Candidate of technical sciences, assistant professor
Донишгоҳи техникии Тоҷикистон ба номи академик М.С. Осимӣ	Таджикский технический университет им. акад. М.С. Осими	Tajik Technical University named after Acadtmician M.S. Osimi
E-mail: akramov.avaz@mail.ru		
0000-0002-7084-9128		

МОДЕЛИРОВАНИЕ И ПРИНЦИПЫ ТЕОРИИ ПОДОБИЯ

¹Д.Н. Низомов, ²И.К. Каландарбеков, ²И.И. Каландарзода, ²Д.Д. Джурахонзода, ²А. Амруллох

¹Институт геологии, сейсмостойкого строительства и сейсмологии НАНТ, Душанбе, Таджикистан

²Таджикский технический университет имени академика М.С. Осими, г. Душанбе, Республика Таджикистан

В статье изложен обзор литературы по моделированию конструкций многоэтажных зданий. Рассмотрен анализ различных методов моделирования конструкций. Показано, что теория подобия, в свою очередь, обеспечивает обоснованность переноса и позволяет использовать данные модельных испытаний для анализа поведения натурных конструкций. Проведение модельных испытаний даёт возможность достаточно точно определить динамические характеристики проектируемой конструкции и при необходимости внести корректировки на стадии проектирования. В качестве примера рассмотрено моделирование динамической задачи балки. Рассмотрены свободные колебания балки с прямоугольным поперечным сечением и равномерно распределённой массой.

Ключевые слова: моделирование, модель, механическое моделирование, физическое моделирование, математическое моделирование, теории подобия, дифференциальное уравнение, критерии подобия.

МОДЕЛСОЗӢ ВА ПРИНЦИПҲОИ НАЗАРИЯИ МОНАНДӢ

¹Д.Н. Низомов, ²И.Қ. Қаландарбеков, ²И.И. Қаландарзода, ²Д.Қ. Чурахонзода, ²А. Амруллох

¹Институт геологии, сейсмостойкого строительства и сейсмологии НАНТ, Душанбе, Таджикистан

²Донишгоҳи техникии Тоҷикистон ба номи академик М.С. Осимӣ, ш. Душанбе, Ҷумҳурии Тоҷикистон

Дар мақола маводи адабиёт оиди моделсозии конструкцияҳои биноҳои бисёршӯна оварда шудааст. Таҳлили методҳои гуногуни моделсозии конструкцияҳо дида баромада шудааст. Нишон дода шудааст, ки назарияи монандӣ дар навбати худ асоснокӣ гузаронидан ва имконияти истифодабарии маълумотҳои санҷиши моделӣ барои таҳлили рафтори конструкцияҳои асли истифода бурда шаванд. Гузаронидани санҷишҳои моделӣ имконият медиҳад, ки характеристикаҳои динамикии конструкцияҳои тарҳрезӣшавандаро бо дақиқии кофӣ муайян карда, дар ҳолати зарурӣ дар марҳилаи тарҳрезӣ ислоҳот ворид намоянд. Ҳамчун мисол моделсозии масъалаҳои динамикии болор дида баромада шудааст. Лаппиши озоди болор бо буриши кундалангии росткунча ва массаи мунтазам тақсимшуда дида баромада шудааст.

Калидвожаҳо: моделсозӣ, модел, моделсозии механикӣ, моделсозии физикӣ, моделсозии математикӣ, назарияи монандӣ, муодилаҳои дифференциалӣ, меъёрҳои монандӣ.

MODELING AND PRINCIPLES OF SIMILARITY THEORY

D.N. Nizomov, I.K. Kalandarbekov, I.I. Kalandarzoda, D.D. Jurahonzoda, A. Amrulloh

¹Institute of Geology, Earthquake Engineering, and Seismology, National Academy of Sciences of Tajikistan, Dushanbe, Tajikistan

²Tajik Technical University named after Academician M.S. Osimi, Dushanbe, Tajikistan

The article presents a literature review on the modeling of multi-storey building structures. An analysis of various methods for modeling structures is considered. It is shown that the theory of similarity, in turn, ensures the validity of data transfer and allows the use of model test data for analyzing the behavior of full-scale (prototype) structures. Conducting model tests makes it possible to determine the dynamic characteristics of the designed structure with sufficient accuracy and, if necessary, to make corrections at the design stage. As an example, the modeling of a dynamic beam problem is considered. Free vibrations of a beam with a rectangular cross-section and uniformly distributed mass are examined.

Keywords: modeling, model, mechanical modeling, physical modeling, mathematical modeling, similarity theory, differential equation, similarity criteria.

Введение

Процесс моделирования основывается на принципе аналогии между реальным объектом и его моделью. При этом свойства исходной системы переносятся на модель с использованием определённых правил, допущений и предположений. Таким образом, модель можно рассматривать как результат отображения структуры одной системы на другую [12].

Моделирование также рассматривается как процесс сопоставления и анализа результатов исследования модельных и натурных объектов на основе принципов подобия. Моделирование представляет собой процесс создания модели, предназначенной для воспроизведения наиболее существенных характеристик и закономерностей исследуемого объекта. По определению Леонида Ивановича Седова, моделирование понимается как замена исследования интересующего явления в реальных условиях изучением аналогичного процесса на модели, которая может иметь меньший

или больший масштаб и исследуется в специально организованных лабораторных условиях. Иными словами, основная идея моделирования заключается в том, что результаты экспериментов, выполненных на модели, позволяют получать необходимые сведения о характере протекания явления, а также определять различные параметры и эффекты, которые проявляются в натурных условиях.

Виды моделирования

Моделирование строительных конструкций можно подразделить на несколько основных видов.

Механическое моделирование - это выполненная в определённом масштабе модель по отношению к реальному объекту с сохранением основных свойств и характеристики оригинала.

Физическое моделирование включает методы, основанные на применении аналогии между уравнениями, которые описывают различные физические процессы и явления. Физическое моделирование представляет собой более общее, включая и механическое моделирование.

Математическое моделирование базируется на разработке специализированных вычислительных алгоритмов и программных средств, позволяющих описывать поведение исследуемых конструкций и проводить численные эксперименты с целью анализа их работы.

Механические процессы моделируются при учёте некоторых главных условий, которые основываются на трёх основных теоремах подобия [4-7]. В этом случае модель и натура должны иметь геометрическое подобие. Одной и той же системой уравнений как в модели, так и в оригинале, которые представляются в безразмерном виде, должны описываться механические процессы. Входящие в эти уравнения безразмерные параметры как для модели, так и для реального объекта обязательно имеют одинаковые численные значения. Следует подчеркнуть, что записанные в безразмерном виде начальные и граничные условия для обоих объектов должны полностью соответствовать друг другу.

Широкое применение во многих областях науки и техники, в частности при исследовании железобетонных конструкций, получили теории подобия и методы физического моделирования [8-12]. При проектировании и возведении сооружений различного назначения, в частности при внедрении новых конструктивных решений, с целью повышения их сейсмостойкости используется физическое моделирование.

Теория подобия составляет основу физического моделирования. Подобие предполагает возможность переноса результатов, полученных при экспериментальном исследовании модели, на реальный объект. Теория подобия, в свою очередь, обеспечивает обоснованность такого переноса и позволяет использовать данные модельных испытаний для анализа поведения натурных конструкций.

Решение подобных задач может осуществляться двумя основными способами: посредством анализа размерностей либо на основе анализа уравнений. Второй способ к определению коэффициентов подобия опирается на вторую теорему подобия и используется в тех случаях, когда исследуемый процесс не имеет строгого или полного математического описания [1-3, 7]

В нашем случае для определения критериев подобия используется второй подход, при котором дифференциальные уравнения приводятся к безразмерной форме. Подобные системы описываются одной и той же системой дифференциальных уравнений и характеризуются сходными условиями однозначности, включая геометрическое и временное подобие, подобие физических параметров, а также подобие начальных и граничных условий.

С целью проверки достоверности и применимости результатов математического моделирования проводятся экспериментальные исследования, которые относятся к физическому моделированию.

Для корректного проведения подобных исследований необходимо обеспечить ряд условий подобия между моделью и натурным объектом.

Использование методов физического моделирования при изучении динамических характеристик строительных конструкций сооружений является самостоятельным направлением исследований, опирающиеся на принципах механического подобия. Особенность физической

модели заключается в том, что происходящие в ней процессы воспроизводят и отражают основные закономерности, характерные для реального объекта.

Таким образом, при условии подобия физической модели и натурного объекта результаты экспериментальных исследований могут быть пересчитаны на реальные условия с использованием соответствующих констант подобия. Безразмерные параметры подобия, характеризующие соотношение одноимённых величин в модели и оригинале, определяются масштабным соотношением между размерами модели и реального объекта. Достаточно корректное определение динамических характеристик проектируемых конструкций возможно при проведении модельных испытаний и при необходимости можно вести корректировки на стадии проектирования.

Система дифференциальных уравнений, описывающая рассматриваемый процесс, совместно с начальными и граничными условиями образует математическую модель, которая применяется как для описания поведения натурного объекта, так и его физической модели.

Теперь рассмотрим кратко порядок создания физической модели, проведения эксперимента и переноса его результатов на натурную конструкцию, который состоит из следующих этапов:

- определение цель и вида испытаний для формулировки задачи исследования и выбора методики испытаний;
- анализ характеристик реальной конструкции, который включает в себя определение поперечных сечений балок, характеристики бетона и арматуры, шага и диаметра стержней и вычисление внешних нагрузок, действующих на конструкцию;
- перечисление основных величин, необходимых для выявления безразмерных параметров, которые управляют поведением системы;
- определение критериев подобия и формулирование условий подобия, которым должна удовлетворять модель;
- выбор и назначение коэффициентов масштабирования, подбора материала модели и требования к их свойствам;
- изготовление масштабной модели на основе теории подобия и назначение нагрузок;
- проведение испытания модели и получение экспериментальных данных для перехода от результатов модели к натурной конструкции.

Здесь рассмотрен один из методов теории подобия – метод анализа дифференциальных уравнений, который получен на основе принципа Даламбера. Данные уравнения описывают колебательные процессы, возникающие в различных конструкциях. Процесс нормализации выполняется в два этапа. На первом этапе все переменные приводятся к безразмерному виду путём выбора соответствующих масштабных параметров. На втором этапе исходная система уравнений преобразуется в безразмерную форму. Необходимо отметить, что максимальные значения этих безразмерных переменных подбирают, таким образом, чтобы они не превышали единицы [9]. Последовательность выполнения этапов применения теории подобия подробно представлена в работе.

В качестве примера рассмотрим решение динамической задачи балки.

Рассматриваются свободные колебания балки с прямоугольным поперечным сечением и равномерно распределённой массой m (рис. 1). В начальный момент времени центра длины балки получает прогиб величиной δ , после чего балка начинает совершать свободные колебания.

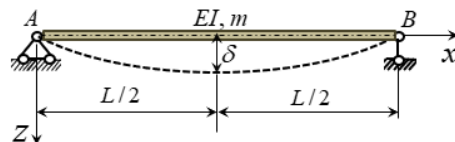


Рисунок 1 - Модель с распределённой массой
Figure 1 – Distributed Mass Model

Дифференциальным уравнением четвёртого порядка описывают свободные колебания балки без учёта затухания.

$$EI \frac{\partial^4 w}{\partial x^4} + m \frac{\partial^2 w}{\partial t^2} = 0. \quad (1)$$

Начальные и граничные условия задачи представляются в виде

$$t = 0, \quad w|_{x=L/2} = \delta, \quad \partial w / \partial t|_{x=L/2} = 0, \\ x = 0, \quad w = 0, \quad \partial^2 w / \partial x^2 = 0, \quad (2)$$

$$x = L, \quad w = 0, \quad \partial^2 w / \partial x^2 = 0.$$

Безразмерные переменные выберем следующим образом

$$\bar{x} = \frac{x}{L}, \quad \bar{t} = \frac{t}{T_1}, \quad \bar{w} = \frac{w}{\delta},$$

здесь δ – максимальное смещение (прогиб) в центре балки,

T_1 – время, соответствующее четверти периода свободных колебаний.

Формула (1) с учётом выражения (2) имеет вид

$$EI \frac{\partial^4 w}{\partial x^4} = EI \frac{\delta}{L^4} \frac{\partial^4 \bar{w}}{\partial \bar{x}^4}, \quad m \frac{\partial^2 w}{\partial t^2} = m \frac{\delta}{T_1^2} \frac{\partial^2 \bar{w}}{\partial \bar{t}^2}, \\ \frac{\partial^4 \bar{w}}{\partial \bar{x}^4} + \pi_1 \frac{\partial^2 \bar{w}}{\partial \bar{t}^2} = 0, \quad \pi_1 = \frac{m L^4}{T_1^2 EI}. \quad (3)$$

Радиус инерции сечения балки равен

$$r = \sqrt{I / A},$$

здесь I – момент инерции поперечного сечения балки;

A – площадь поперечного сечения.

Скорость продольной волны определяется из формулы

$$c = \sqrt{E / \rho},$$

тогда параметр подобия π_1 запишется в виде

$$\pi_1 = \frac{m L^4}{T_1^2 EI} = \left| m = \rho A, \quad I = A r^2, \quad E = \rho c^2 \right| = \left(\frac{L^2}{c r T_1} \right)^2. \quad (4)$$

Начальные и граничные условия в безразмерных переменных имеют вид

$$t = 0, \quad \bar{w}|_{\bar{x}=1/2} = 1, \quad \partial \bar{w} / \partial \bar{t}|_{\bar{x}=1/2} = 0, \\ \bar{x} = 0, \quad \bar{w} = 0, \quad \partial^2 \bar{w} / \partial \bar{x}^2 = 0, \quad (5) \\ \bar{x} = 1, \quad \bar{w} = 0, \quad \partial^2 \bar{w} / \partial \bar{x}^2 = 0.$$

Необходимо отметить, что нормализованные, то есть приведённые к безразмерному виду, начальные и граничные условия не включают параметры подобия. Учитывая принцип подобия между моделью и натурой, свободные колебания которых описывается уравнением (3), записываются так:

$$\pi_{1,m} = \pi_{1,n}, \quad \rightarrow \quad \left(\frac{L^2}{c r T_1} \right)_m = \left(\frac{L^2}{c r T_1} \right)_n, \quad T_{1,n} = T_{1,m} \frac{L_n^2}{L_m^2} \frac{c_m}{c_n} \frac{r_m}{r_n}. \quad (6)$$

Из формулы (6) видно, что, получив из эксперимента на модели свободные колебания, без решения дифференциального уравнения можно прогнозировать основной период свободных колебаний натурной балки. Например, если модель выполнена в масштабе 1:4 и изготовлена из того же материала, что и натурная, то использование выражения (6) даёт возможность найти

$$\frac{r_m}{r_n} = \frac{1}{4}, \quad \frac{c_m}{c_n} = 1, \quad \left(\frac{L_n}{L_m} \right)^2 = 16, \quad T_{1,n} = 4T_{1,m}.$$

если модель выполнена в масштабе 1:10 и изготовлена из того же материала, что и реальная, то из выражения (6) имеем

$$\frac{r_m}{r_n} = \frac{1}{10}, \quad \frac{c_m}{c_n} = 1, \quad \left(\frac{L_n}{L_m} \right)^2 = 100, \quad T_{1,n} = 10T_{1,m}.$$

С учётом начальных и граничных условий, изложенных в (5), следует решить дифференциальное уравнение (3) для определения амплитуд свободных колебаний балки.

Вывод

Моделирование, основанное на принципах теории подобия, представляет собой эффективный метод исследования напряжённо-деформированного состояния железобетонных конструкций, особенно в тех случаях, когда проведение натурных испытаний экономически нецелесообразно.

Рецензент: Сангинов А.М. - к.т.н., ведущий научный сотрудник лаборатории сейсмостойкости зданий и сооружений Института геологии, сейсмостойкого строительства и сейсмологии Национальной академии наук Таджикистана

Литература

1. Алабужев, П.М. Теория подобия и размерностей. Моделирование. [Текст] / П.М. Алабужев, В.В. Геронимус, Л. М. Минкевич, Б.А. Шеховцов. - М.: Высшая школа, 1968. - 206 с.
2. Баренблатт, Г.И. Анализ размерностей [Текст] / Г.И. Баренблатт. - М.: МФТИ, 1987. - 168 с.
3. Кирпичев, М.В. Теория подобия [Текст] / М.В. Кирпичев. - М.: Изд-во АН СССР, 1953. - 96 с.
4. Кирпичев, М.В. Математические основы теории подобия [Текст] / М.В. Кирпичев, П.К. Конаков. - М.: Изд-во АН СССР, 1949. - 103 с.
5. Клайн, С. Дж. Подобие и приближенные методы [Текст] / С. Дж. Клайн. - М.: «Мир», 1968. - 302 с.
6. Додонов, М.И. Развитие расчётных моделей дисков сборных железобетонных перекрытий при действии на них горизонтальной (ветровой) нагрузки/ М.И.Додонов, Каландарбеков И. // Реферативный журнал «Строительства и архитектура» серия 11, вып. 9, № 4058 Москва, 1983. - 20с.
7. Назаров, А.А. Основы теории подобия и моделирования [Текст] / А.А. Назаров // Терминология. Сборник рекомендуемых терминов/ вып 88. М.: Наука, 1973. - 50с.
8. Низомов, Д.Н. Численное моделирование динамических задач по расчёту зданий с учётом сейсмоизоляции /Д.Н. Низомов, И.К.Каландарбеков, И.И. Каландарбеков. - Душанбе: «Дониш», 2025.- 286с.
9. Низомов, Д.Н. Моделирование задач строительной механики на основе теории подобия/Д.Н. Низомов, И.К.Каландарбеков, И.И. Каландарбеков //Доклады НАН Таджикистана. – 2023. Т.66.- № 1-2. - С. 80-88.
10. Низомов, Д.Н. Моделирование сейсмоизолированных зданий на основе теории подобия /Д.Н. Низомов, И.К.Каландарбеков, И.И. Каландарбеков//Известия НАН Таджикистана. Отделение физико - математических, химических, геологических и технических наук. - 2023. - № 1(190). - С. 109-116.
11. Седов, Л.И. Методы подобия и размерности в механике [Текст] / Л.И. Седов. - М.: Наука, 1977. - 440 с.
12. Шаповалов, Л.А. Моделирование в задачах механики элементов конструкций [Текст] / Л.А. Шаповалов. - М.: Машиностроение, 1990. - 288 с.

Литература

1. Alabuzhev, P.M., Geronimus, V.V., Minkevich, L.M., Shekhovtsov, B.A. Theory of Similarity and Dimensions. Modeling. Moscow: Vysshaya Shkola, 1968, 206 p. (In Russian).
2. Barenblatt, G.I. Dimensional Analysis. Moscow: Moscow Institute of Physics and Technology, 1987, 168 p.
3. Venikov, V.A. Theory of Similarity and Modeling (Applied to Problems of Electric Power Engineering). Moscow: Vysshaya Shkola, 1976, 479 p. (In Russian).
4. Kirpichev, M.V., Konakov, P.K. Mathematical Foundations of the Theory of Similarity. Moscow: Publishing House of the Academy of Sciences of the USSR, 1949, 103 p. (In Russian).
5. Klein, S.J. Similarity and Approximate Methods. Moscow: Mir Publishers, 1968, 302 p. (In Russian).

6. Dodonov, M.I., Kalandarbekov, I. Development of Computational Models of Precast Reinforced Concrete Floor Disks under Horizontal (Wind) Loads. Abstract Journal "Construction and Architecture", Series 11, Issue 9, No. 4058. Moscow, 1983, 20 p. (In Russian).
7. Nazarov, A.A. Fundamentals of the Theory of Similarity and Modeling. In: Terminology. Collection of Recommended Terms, Issue 88. Moscow: Nauka, 1973, 50 p. (In Russian).
8. Nizomov, D.N., Kalandarbekov, I.K., Kalandarbekov, I.I. Numerical Modeling of Dynamic Problems for Structural Analysis of Buildings Considering Seismic Isolation. Dushanbe: Donish, 2025, 286 p. (In Russian).
9. Nizomov, D.N., Kalandarbekov, I.K., Kalandarbekov, I.I. Modeling of Structural Mechanics Problems Based on the Theory of Similarity. Reports of the National Academy of Sciences of Tajikistan. 2023, Vol. 66, No. 1–2, pp. 80–88. (In Russian).
10. Nizomov, D.N., Kalandarbekov, I.K., Kalandarbekov, I.I. Modeling of Seismic-Isolated Buildings Based on the Theory of Similarity. Proceedings of the National Academy of Sciences of Tajikistan. Department of Physical-Mathematical, Chemical, Geological and Technical Sciences. 2023, No. 1(190), pp. 109–116. (In Russian).
11. Sedov, L.I. Similarity and Dimensional Methods in Mechanics. Moscow: Nauka, 1977, 440 p. (In Russian).
12. Shapovalov, L.A. Modeling in Problems of Structural Element Mechanics. Moscow: Mashinostroenie, 1990, 288 p. (In Russian).

МАЪЛУМОТ ДАР БОРАИ МУАЛЛИФОН- СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ- INFORMATION ABOUT AUTHORS

TJ	RU	EN
Низомов Ҷ.Н.	Низомов Дж.Н.	Nizomov J.N.
Доктори илмҳои техникаӣ, проф.	Доктор технических наук, проф.	Doctor of technical sciences, professor
ДТТ баноми академик М.С. Осимӣ	ТТУ им. акад. М.С. Осими,	TTU named after Acadtmician M.S. Osimi
E-mail: tices@mail.ru		
0009-0006-5424-4109		
TJ	RU	EN
Қаландарбеков И.	Каландарбеков И.	Kalandarbekov I.
Доктори илмҳои техникаӣ, проф.	Доктор технических наук, проф.	Doctor of technical sciences, professor
ДТТ баноми академик М.С. Осимӣ	ТТУ им. акад. М.С. Осими,	TTU named after Acadtmician M.S. Osimi
E-mail: kalandarbekovimomyorbek@gmail.com		
TJ	RU	EN
Қаландарзода И.И.	Каландарзода И.И.	Kalandarzoda I.I.
Номзади илмҳои техникаӣ, дотсент	Кандидат технических наук, доцент	Candidate of technical sciences, Assoc. Prof.
ДТТ баноми академик М.С. Осимӣ	ТТУ им. акад. М.С. Осими,	TTU named after Acadtmician M.S. Osimi
E-mail: q.iftikhor@gmail.ru		
0000-0003-4248-179X		
TJ	RU	EN
Ҷурахонзода Д.Ҷ.	Джурахонзода Д.Д.	Jurakhonzoda D.J.
Номзади илмҳои техникаӣ	Кандидат технических наук	Candidate of technical sciences
ДТТ баноми академик М.С. Осимӣ	ТТУ им. акад. М.С. Осими,	TTU named after Acadtmician M.S. Osimi
E-mail: disvaliev@mail.ru		
TJ	RU	EN
Амруллоҳ А.	Амруллоҳ А.	Amrulloh A.
Докторанти PhD	Докторант PhD	Doctoral student
ДТТ баноми академик М.С. Осимӣ	ТТУ им. акад. М.С. Осими,	TTU named after Acadtmician M.S. Osimi

ОЦЕНКА ТЕКУЩЕЙ СИТУАЦИИ В СФЕРЕ ВОДОСНАБЖЕНИЯ И ВОДООТВЕДЕНИЯ В РЕСПУБЛИКЕ ТАДЖИКИСТАН

М.Б. Бердизода, А.Ю. Норматов

Таджикский технический университет имени академика М.С. Осими, г. Душанбе, Республика Таджикистан

В работе проведена комплексная оценка состояния систем водоснабжения и водоотведения в Республике Таджикистан с акцентом на территориальные различия в обеспеченности населения коммунальными услугами. Проанализированы объёмы и распределение водных ресурсов страны: установлено, что на долю Таджикистана приходится около 55,4 % речного стока бассейна Аральского моря, при этом на хозяйственно-питьевые нужды используется лишь 2–3 % общего объёма водных ресурсов. Исследовано текущее состояние инфраструктуры водоснабжения и водоотведения по типам населённых пунктов - городам, посёлкам городского типа и сельским джамоатам; выявлены существенные диспропорции в уровне обеспеченности услугами между городской и сельской местностью. Определены доли населения, имеющего доступ к централизованному и нецентрализованному источникам воды: в целом по стране централизованным питьевым водоснабжением охвачено 41 % жителей, а системами водоотведения - лишь 15 %. Сформирована картина основных источников питьевого водоснабжения: установлено, что 53 % питьевой воды производится из подземных вод, 10 % - из родников, 37 % - из рек и каналов. Представлены данные о способах водопользования среди населения, не охваченного централизованными системами: значительная часть жителей использует неглубокие колодцы, родниковую или поверхностную воду, а 8 % вынуждены доставлять воду на большие расстояния.

Ключевые слова: водоснабжение, водоотведение, Таджикистан, доступ к воде, коммунальное хозяйство, санитария.

АРЗЁБИИ ВАЗЪИЯТИ ҲОЗИРА ДАР СОҲАИ ТАЪМИНОТИ ОБИ НЎШОКӢ ВА ОБИХРОҶӢ ДАР ҶУМҲУРИИ ТОҶИКИСТОН

М.Б. Бердизода, А.Ю. Норматов

Донишгоҳи техникии Тоҷикистон ба номи академик М.С. Осимӣ, ш. Душанбе, Ҷумҳурии Тоҷикистон

Дар мақола арзёбии ҳамаҷонибаи ҳолати низомҳои таъминоти об ва рафъи обҳои партов дар Ҷумҳурии Тоҷикистон бо таваҷҷуҳ ба фарқиятҳои ҳудудӣ дар сатҳи таъмини аҳоли бо хизматрасониҳои коммуналӣ анҷом дода шудааст. Ҳаҷм ва тақсими захираҳои обии кишвар таҳлил гардида, муайян карда шуд, ки ба ҳиссаи Тоҷикистон тақрибан 55,4 % маҷрои дарёҳои ҳавзаи баҳри Арал рост меояд, дар ҳоле ки барои эҳтиёҷоти хоҷагии нӯшокӣ танҳо 2–3 % ҳаҷми умумии захираҳои обӣ истифода мешавад. Ҳолати кунунии инфрасохтори таъминоти об ва рафъи обҳои партов вобаста ба намудҳои маҳалҳои аҳолинишин – шаҳрҳо, шаҳракҳои типӣ шаҳрӣ ва ҷамоатҳои деҳот – таҳқиқ карда шуда, нобаробарии назаррас дар сатҳи дастрасии аҳоли ба хизматрасониҳо байни минтақаҳои шаҳрӣ ва деҳотӣ муайян гардид. Ҳиссаи аҳолие, ки ба манбаҳои марказонидашуда ва ғайримарказонидашудаи об дастрасӣ дорад, муайян карда шуд. Дар маҷмӯъ, дар кишвар бо обтаъминкунии марказонидашудаи нӯшокӣ 41 % аҳоли таъмин буда, бо низомҳои рафъи обҳои партов танҳо 15 % аҳоли фаро гирифта шудааст. Муайян гардид, ки дар шаҳрҳо сатҳи таъминот бо оби нӯшокӣ ба 95 % мерасад, дар ҳоле ки дар ҷамоатҳои деҳотӣ ин нишондиҳанда танҳо 22 % мебошад. Ҳамчунин тарзҳои истифодаи об аз ҷониби аҳолие, ки ба низомҳои марказонидашуда пайваст нестанд, таҳлил гардиданд. Нишон дода шуд, ки қисми зиёди сокинон аз ҷохҳои камҷуқур, оби чашмаҳо ё манбаҳои оби рӯизаминӣ истифода мебаранд, дар ҳоле ки 8 % аҳоли маҷбур аст обро аз масофаҳои дур интиқол диҳад.

Калидвожаҳо: таъминоти об, обихроҷӣ, Тоҷикистон, дастрасӣ ба об, хоҷагии коммуналӣ, санитария.

EVALUATION OF THE SITUATION IN THE REPUBLIC OF TAJIKISTAN

M.B. Berdizoda, A.Yu. Normatov

Tajik Technical University named after Academician M.S. Osimi, Dushanbe, Republic of Tajikistan

This study presents a comprehensive assessment of the condition of water supply and wastewater disposal systems in the Republic of Tajikistan, with an emphasis on territorial disparities in the provision of public utility services to the population. The volumes and distribution of the country's water resources were analyzed. It was established that Tajikistan accounts for approximately 55.4% of the river flow in the Aral Sea basin, while only 2–3% of the total water resources are used for domestic and drinking purposes. The current state of water supply and wastewater disposal infrastructure was investigated according to the types of settlements, including cities, urban-type settlements, and rural jamoats. Significant disparities in service coverage levels between urban and rural areas were identified. The shares of the population with access to centralized and non-centralized water sources were determined. Overall, centralized drinking water supply covers 41% of the country's population, while wastewater disposal systems serve only 15% of residents. The main sources of drinking water supply were identified: 53% of drinking water is produced from groundwater, 10% from springs, and 37% from rivers and canals. Data on water use practices among the population not covered by centralized systems were presented, showing that a significant proportion of residents use shallow wells, spring water, or surface water sources, while 8% are forced to transport water over long distances.

Keywords: water supply, water drainage, Tajikistan, access to water, communal services, sanitation.

Введение

Сектор водоснабжения и водоотведения является важнейшей составляющей социальной инфраструктуры и устойчивого развития государства. Несмотря на значительные водные ресурсы, Республика Таджикистан сталкивается с рядом проблем в обеспечении населения качественной питьевой водой и санитарными услугами.

Таджикистан обладает значительными водными ресурсами и играет важную роль как страна верховья в бассейне реки Амударьи, а также располагается в средней части бассейна реки Сырдарьи — двух крупнейших водных систем, питающих Аральское море. Ежегодный объём формируемых поверхностных вод составляет около 64 км³, из которых 1,1 км³ приходится на бассейн Сырдарьи и 62,9 км³ — на бассейн Амударьи. Таким образом, на долю Таджикистана приходится около 55,4% общего речного стока бассейна Аральского моря. Качество воды в зонах формирования основных рек соответствует требованиям, предъявляемым к питьевому водоснабжению [1, 2].

На территории страны расположено порядка 1300 природных озёр общей площадью около 705 км² и суммарным объёмом воды 46,3 км³, из которых приблизительно 20 км³ приходится на пресные воды. Помимо этого, в Таджикистане эксплуатируется 11 водохранилищ с совокупным полезным объёмом около 7,63 км³. Потенциальные ресурсы подземных вод оцениваются в 18,7 км³ в год, при этом их возобновляемая часть составляет примерно 3 км³ ежегодно, из которых в настоящее время используется около 2,8 км³.

Распределение водных ресурсов рек Амударья и Сырдарья между странами региона — Таджикистаном, Казахстаном, Кыргызстаном, Узбекистаном и Туркменистаном — осуществляется в соответствии с утверждёнными схемами комплексного использования и охраны вод. В рамках этих договорённостей для Таджикистана установлен годовой лимит водозабора: 9,5 км³ из бассейна Амударьи и 1,81 км³ из бассейна Сырдарьи [1, 6].

Водные ресурсы страны находят применение в различных сферах, включая питьевое водоснабжение и водоотведение, гидроэнергетику, сельское хозяйство, промышленность, рыбное хозяйство, а также рекреационные цели.

При этом приоритетным направлением является обеспечение населения качественной питьевой водой и санитарными услугами. Для этих целей используются водные источники, защищённые от загрязнения, соответствие которых санитарным нормам подтверждается эпидемиологическими заключениями. Имеющиеся запасы пресной воды создают предпосылки для устойчивого и долгосрочного водоснабжения населения страны.

Цель и постановка задачи исследования

Цель исследования. Цель данной работы заключается в том, что комплексной оценкой текущего состояния систем водоснабжения и водоотведения в Республике Таджикистан является выявление ключевых проблем их функционирования, а также определение перспективных направлений устойчивого развития отрасли в современных социально-экономических и природно-климатических условиях.

Задачи исследования: для достижения поставленной цели в работе решаются следующие основные задачи: проанализировать современное состояние систем питьевого водоснабжения и водоотведения в Республике Таджикистан, оценить уровень обеспеченности населения услугами водоснабжения и водоотведения, исследовать техническое состояние существующей инфраструктуры, выявить основные факторы, провести анализ использования водных ресурсов в различных секторах экономики и предложить рекомендации по улучшению управления и привлечению инвестиций в отрасль.

Методы исследования

В данной работе методом исследования являются аналитический метод, который используется для изучения научной литературы, нормативно-правовых документов и статистических данных, а также сравнительный анализ, при котором будут оценивать динамику показателей водоснабжения и водоотведения за различные периоды. Кроме того, для обработки количественных данных и выявления тенденций и комплексного рассмотрения взаимосвязей между

элементами водохозяйственной системы также используются метод: статистический и системный подход.

Республика Таджикистан, столицей которой является город Душанбе, включает в себя Горно-Бадахшанскую автономную область (ГБАО), Согдийскую и Хатлонскую области. В административно-территориальном отношении страна насчитывает 18 городов и 51 район (в том числе 13 районов республиканского подчинения), а также 4 внутригородских района, 65 посёлков городского типа и 368 сельских джамоатов.

В представленной ниже таблице отражена численность населения по областям на основе результатов общенационального исследования, проведённого в 2022 году в рамках Проекта водоснабжения и санитарии сельской местности, а также других источников [1, 2, 6].

Таблица 1- Республика Таджикистан – численность населения в разрезе областей

Table 1 – Population of the Republic of Tajikistan by Regions

Проживание населения	Душанбе	РРП	ГБАО	Хатлон	Согд	Всего
Население	1,201,700	2,102,150	231,351	3,515,396	2,912,497	9,963,094
% от общей численности населения	9%	23%	2%	36%	29%	100%
Города	1	4	1	4	8	18
Районы	4	9	7	21	10	51
Посёлки городского типа	0	15	4	23	23	65
Сельские джамоаты	0	101	42	132	93	368
Площадь (км ²)	31	28,360	62,837	24,609	26,268	142,105
Площадь жилых районов – всего (км ²)	31	753	230	1,245	1,059	3,319
% жилых районов к общей площади	100.00%	2.66%	0.37%	5.06%	4.03%	2.34%

Доступ к услугам питьевого водоснабжения и водоотведения представляет собой гарантированную возможность населения получать безопасную питьевую воду и пользоваться системами канализации.

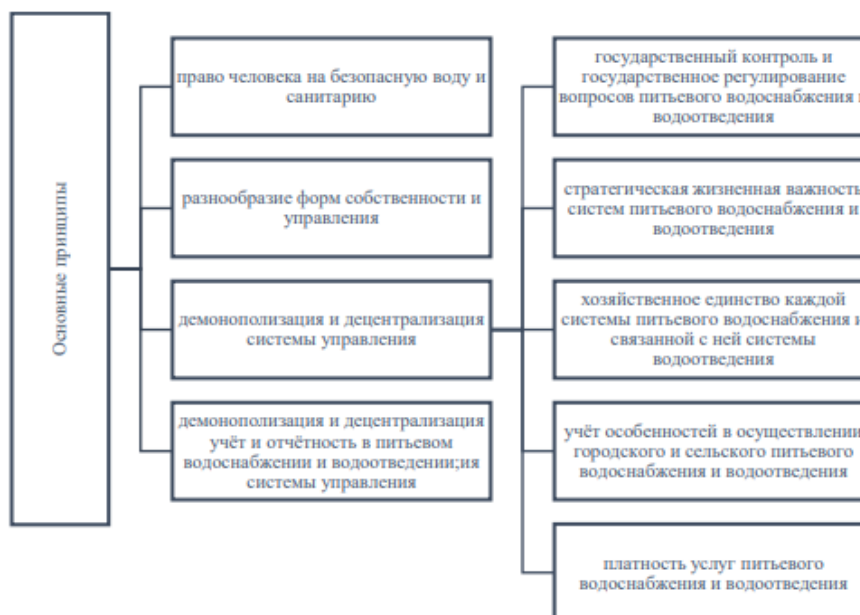


Рисунок 1 – Принципы питьевого водоснабжения и водоотведения обеспечения населения
Figure 1 – Principles of Drinking Water Supply and Wastewater Disposal for Population Provision

Он обеспечивается как технической доступностью (наличием соответствующей инфраструктуры), так и финансовой доступностью (приемлемым уровнем тарифов) и выступает

одним из ключевых показателей качества жизни, способствующих обеспечению санитарно-эпидемиологической безопасности.

Закон Республики Таджикистан «О питьевом водоснабжении и водоотведении» определяет правовые, организационные, экономические и социальные основы обеспечения населения питьевой водой и услугами водоотведения. Он устанавливает государственные гарантии удовлетворения потребностей в питьевой воде, а также требования к её качеству и безопасности, и играет важную роль в решении инженерных задач в данной сфере [7]. На рисунке 1 ниже представлены основные принципы питьевого водоснабжения и водоотведения.

В настоящее время доступ к системам питьевого водоснабжения (централизованным и нецентрализованным) имеют около 4,03 млн человек, что составляет 41% от общей численности населения. Обеспечение питьевой водой осуществляется различными организациями водоснабжения и водоотведения, при этом основным источником водоснабжения преимущественно являются подземные воды.

В горных районах страны основными источниками питьевого водоснабжения являются родники и ледники. В целом по Республике Таджикистан действует множество водозаборных сооружений, использующих подземные воды, родниковые источники, а также воду из рек и каналов. Годовой объём производства питьевой воды составляет около 400 млн м³, из которых 53% обеспечивается за счёт подземных вод, 10% — родников, и 37% — рек и каналов [2, 6, 7]. Ниже приведены данные об источниках питьевого водоснабжения.

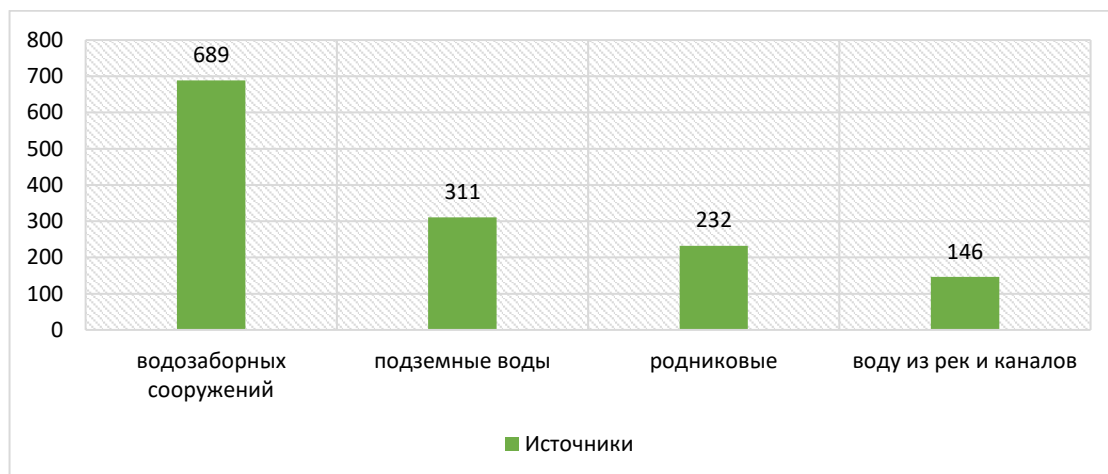


Рисунок 2 – Источники питьевого водоснабжения в Республике Таджикистан
Figure 2 – Sources of Drinking Water Supply in the Republic of Tajikistan

Около 59% населения не имеют доступа к системам централизованного питьевого водоснабжения, обслуживаемым специализированными организациями. В связи с этим они используют нецентрализованные или автономные источники водоснабжения (преимущественно подземные воды), которые зачастую не соответствуют требованиям качества, установленным санитарными нормами (СанПиН 2.1.4.005-07), либо применяют поверхностные воды без предварительной очистки, не отвечающие нормативам безопасности питьевой воды.

По результатам общенационального исследования 2022 года установлено, что среди данного населения 19% используют собственные неглубокие колодцы, 14% — родниковую воду, 18% — воду из рек, каналов, озёр или дождевых накопителей, а 8% не имеют доступа к источникам воды вблизи места проживания и вынуждены доставлять её на значительные расстояния.

В работе [2] также представлена оценка водных ресурсов, состояния и перспектив развития систем водоснабжения населённых пунктов Республики Таджикистан, рассмотрены источники водоснабжения и необходимость строительства водозаборных и очистных сооружений.

Таджикистан обладает значительными водными ресурсами и занимает одно из ведущих мест среди стран СНГ. Из общего речного стока, составляющего 80,2 км³, около 50,2 км³ (62,6%)

формируется на территории республики. При этом на хозяйственно-питьевое водоснабжение используется лишь 2–3% от общего объёма водных ресурсов. Несмотря на высокий водный потенциал, в ряде районов страны наблюдается дефицит воды.

На основе вышеуказанных сведений о проблеме питьевого водоснабжения и водоотведения ниже представлены результаты и статистические данные по всей Республики Таджикистан. Следующие данные используются для проведения корректного анализа и формирования перспектив решения проблем совершенствования данных систем.

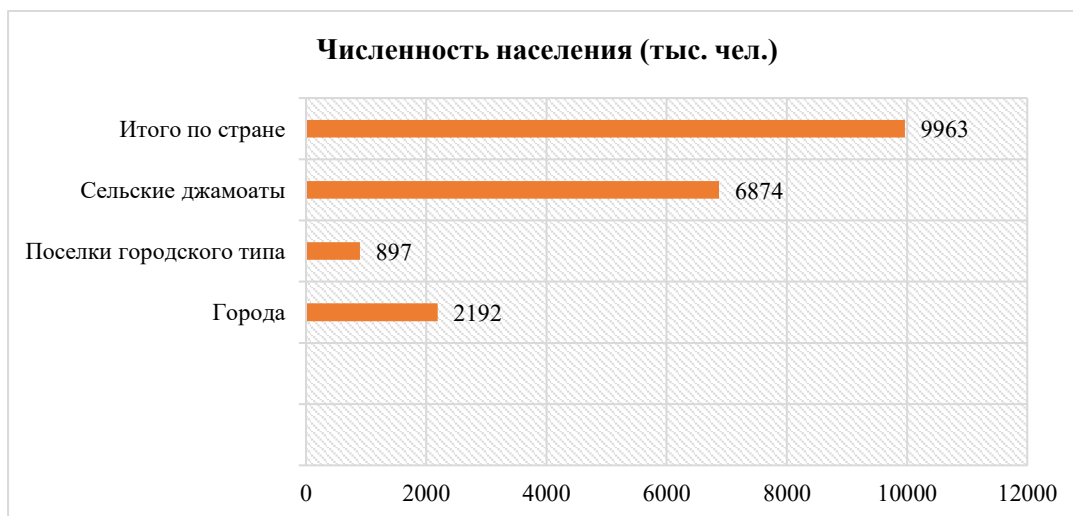


Рисунок 3 - Доступ к системам питьевого водоснабжения и водоотведения численность населения (тыс. чел.)
 Figure 3 – Access to Drinking Water Supply and Wastewater Disposal Systems by Population (thousand people)

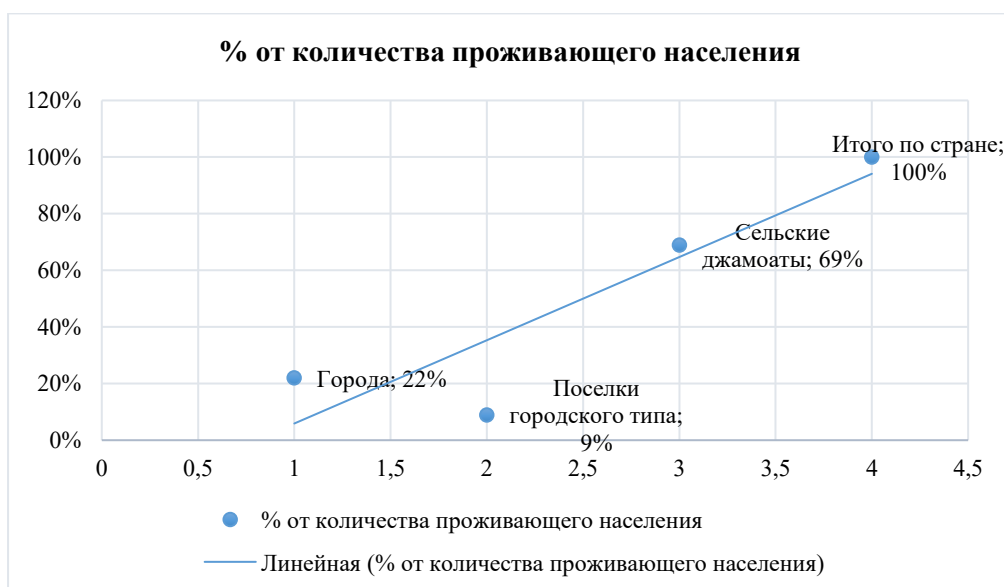


Рисунок 4 - Доступ к системам питьевого водоснабжения и водоотведения от количества проживающего населения
 Figure 4 – Access to Drinking Water Supply and Wastewater Disposal Systems as a Percentage of the Total Resident Population

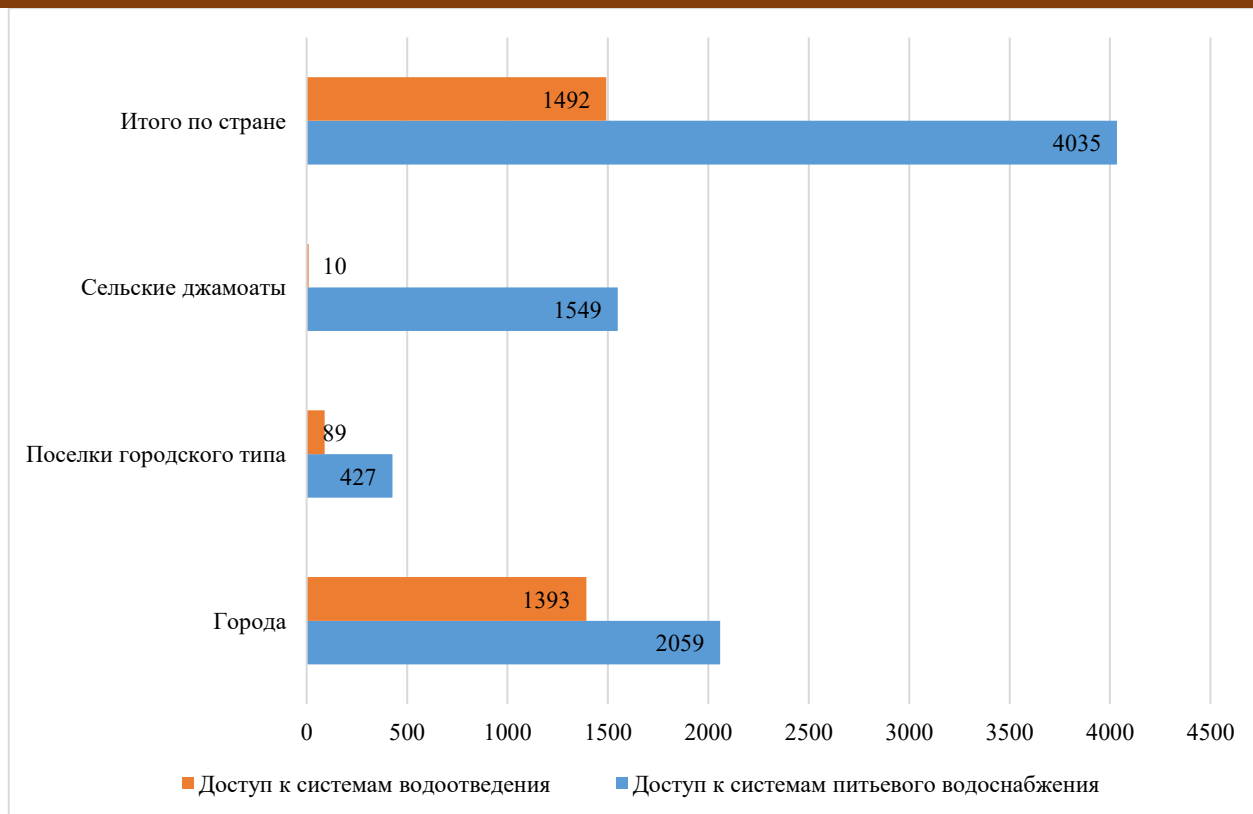


Рисунок 5 - Доступ к системам питьевого водоснабжения и водоотведения от количества проживающего населения
 Figure 5 – Access to Drinking Water Supply and Wastewater Disposal Systems as a Percentage of the Total Resident Population

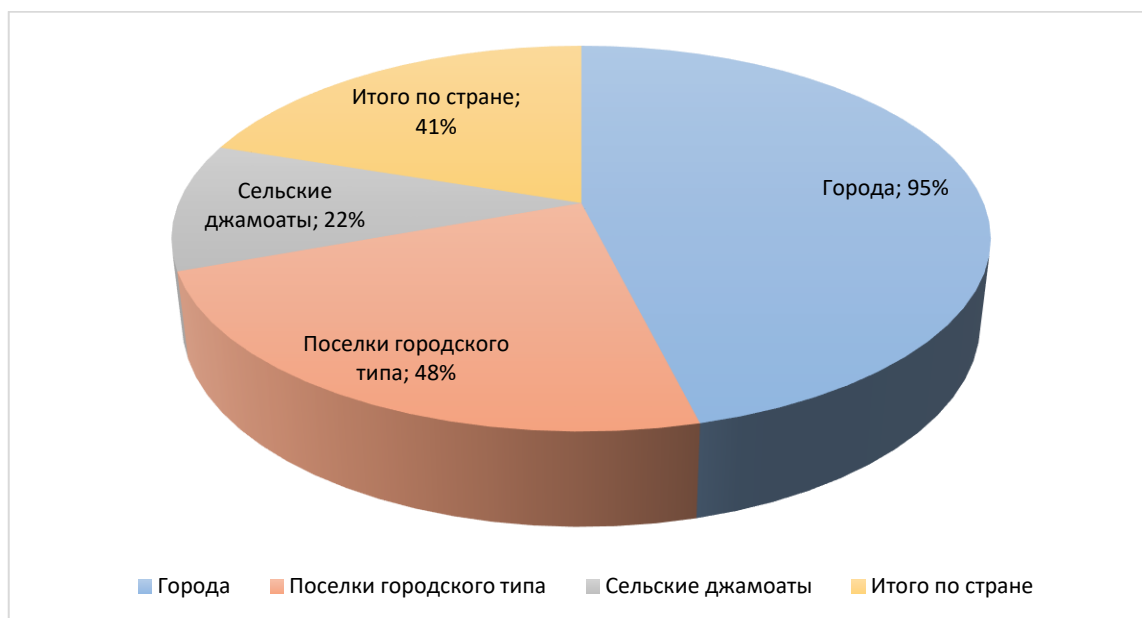


Рисунок 6- Доступ к системам питьевого водоснабжения по проценту %
 Figure 6 – Access to Drinking Water Supply Systems (Percentage, %)



Рисунок 7- Доступ к системам водоотведения по проценту %
 Figure 7 – Access to Wastewater Disposal Systems (Percentage, %)

Результаты и обсуждения

В городах наблюдается наиболее высокий уровень обеспеченности инфраструктурой водоснабжения и водоотведения. Питьевое водоснабжение охватывает и составляет 95% (2,059 тыс. чел.), что свидетельствует о практически полной обеспеченности городского населения централизованной водой. Это отражает приоритетное развитие инженерной инфраструктуры в городах.

Результаты по водоотведению показывают, что доступ имеют 64 % (1,393 тыс. чел.). Хотя показатель значительно ниже водоснабжения, он остается самым высоким среди всех категорий населённых пунктов. В городах системы водоотведения развиты, но всё ещё требуют расширения.

Уровень обеспеченности заметно ниже по сравнению с городами, а питьевое водоснабжение охватывает 48 % (427 тыс. чел.), то есть менее половины населения обеспечено централизованной водой.

Поэтому система водоснабжения развита недостаточно и требует модернизации. Доступ водоотведения в посёлках городского типа имеют всего 10 % (89 тыс. чел.). Из этого можно сделать вывод, что системы водоотведения практически отсутствуют или сильно ограничены.

Наиболее проблемная категория по доступу к услугам питьевого водоснабжения - это сельские джамоаты. Только 22 % (1,549 тыс. чел.) имеют доступ к централизованной воде. Большая часть сельского населения использует альтернативные источники (колодцы, арыки, родники), что может негативно влиять на качество воды. Водоотведение в данном случае крайне низкий показатель — 0,1% (10 тыс. чел.). Значит системы водоотведения практически отсутствуют, что создает экологические и санитарные риски.

Общенациональная картина показывает значительный дисбаланс между городом и селом. Общее обеспечение питьевым водоснабжением составляет 41% (4,035 тыс. чел.). Менее половины населения страны обеспечено централизованным водоснабжением. Общее обеспечение водоотведения всего составляет 15% (1,492 тыс. чел. имеют доступ к водоотведению). Можно сделать вывод, что система водоотведения развита слабо, особенно в сельской местности.

Как видно из вышеуказанных данных, (рисунки 1- 5) наблюдается резкий разрыв между городскими и сельскими территориями. Основные проблемы сосредоточены в сельских районах и

ПГТ. Водоснабжение развито лучше, чем водоотведение, однако и оно недостаточно охватывает население.

Для этого требуется развитие централизованных систем в сельской местности, модернизация инфраструктуры в ПГТ и приоритетное развитие системы водоотведения по всей стране. После проведения исследования сделаны следующие выводы.

Выводы

Проведённые анализы показали, что уровень обеспеченности населения Республики Таджикистан системами питьевого водоснабжения и водоотведения остаётся недостаточным и характеризуется значительной территориальной дифференциацией:

1. Был выявлен существенный разрыв между городскими и сельскими территориями.
2. В городах практически всё население обеспечено централизованным питьевым водоснабжением (95 %), тогда как в сельских джамоатах данный показатель составляет лишь 22 %. Это свидетельствует о неравномерности развития инженерной инфраструктуры и приоритетной концентрации ресурсов в городских центрах.
3. Ситуация с водоотведением является ещё более проблемной. Даже в городах уровень охвата составляет только 64%, тогда как в посёлках городского типа — 10%, а в сельской местности — всего 0,1%. Это указывает на критически низкий уровень развития канализационных систем, особенно в сельских районах, где они практически отсутствуют.
4. В целом по стране централизованным питьевым водоснабжением обеспечено лишь 41 % населения, а системами водоотведения — 15 %. Таким образом, большая часть населения не имеет доступа к базовым коммунальным услугам, что может негативно сказываться на санитарно-эпидемиологической обстановке и качестве жизни.
5. Особое внимание следует уделить сельским территориям, где население в основном использует альтернативные источники водоснабжения (родники, колодцы, открытые водоёмы), что повышает риски загрязнения воды и распространения инфекционных заболеваний.

Рецензент: Хақимов Т.Х. — к.т.н., доцент кафедра машин и аппаратов Технологического университета Таджикистана.

Литература

1. Марамов, М.Б. Установка для предварительного безреагентного осветления высокомутных вод: диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности 05.23.04 – Водоснабжение, канализация, строительные системы охраны водных ресурсов / М.Б. Марамов. – Душанбе, 2021. – 138 с.
2. Норматов, А. Ю. Источники водоснабжения и водозаборно-очистные сооружения для предварительной очистки высокомутных вод / А. Ю. Норматов, М. Б. Марамов // Политехнический вестник. Серия: Инженерные исследования. – 2019. – № 1(45). – С. 233-237. – EDN WJHOMA.
3. Марамов, М. Б. Состояние и перспективы развития водоснабжения в Республике Таджикистан / М. Б. Марамов, А. Норматов, З. А. Набиев // Фундаментальные и прикладные научные исследования: актуальные вопросы, достижения и инновации : сборник статей XXIII Международной научно-практической конференции : в 3 ч., Пенза, 15 мая 2019 года. Том Часть 1. – Пенза: "Наука и Просвещение" (ИП Гуляев Г.Ю.), 2019. – С. 146-149. – EDN ZNAXON.
4. Правительство Республики Таджикистан. Государственная программа питьевого водоснабжения и водоотведения на период до 2032 года. — Душанбе, 2020.
5. Водный кодекс Республики Таджикистан от 2 апреля 2020 года, №1688.
6. Закон Республики Таджикистан «О питьевом водоснабжении и водоотведении» от 19 июля 2019 года, №1633.
7. Закон Республики Таджикистан «Об охране окружающей среды» от 2 августа 2011, №760. Душанбе, 2011.

References

1. Maramov, M.B. Installation for Preliminary Reagent-Free Clarification of Highly Turbid Waters: Dissertation submitted for the degree of Candidate of Technical Sciences in the specialty 05.23.04 – Water Supply, Sewerage, Building Systems for Protection of Water Resources. Dushanbe, 2021, 138 p. (In Russian).

2. Normatov, A.Yu., Maramov, M.B. Water Supply Sources and Water Intake and Treatment Facilities for Preliminary Treatment of Highly Turbid Waters. Polytechnic Bulletin. Series: Engineering Research. 2019, No. 1(45), pp. 233–237. EDN WJHQMA. (In Russian).

3. Maramov, M.B., Normatov, A., Nabiev, Z.A. Current State and Prospects for the Development of Water Supply in the Republic of Tajikistan. In: Fundamental and Applied Scientific Research: Current Issues, Achievements and Innovations: Proceedings of the XXIII International Scientific and Practical Conference, Penza, May 15, 2019. Part 1. Penza: "Nauka i Prosveshchenie" (IP Gulyaev G.Yu.), 2019, pp. 146–149. EDN ZHAXOH. (In Russian).

4. Government of the Republic of Tajikistan. State Program for Drinking Water Supply and Wastewater Disposal for the Period up to 2032. Dushanbe, 2020. (In Russian).

5. Water Code of the Republic of Tajikistan No. 1688 dated April 2, 2020. (In Russian).

6. Law of the Republic of Tajikistan “On Drinking Water Supply and Wastewater Disposal” No. 1633 dated July 19, 2019. (In Russian).

7. Law of the Republic of Tajikistan “On Environmental Protection” No. 760 dated August 2, 2011. Dushanbe, 2011. (In Russian).

МАЪЛУМОТ ДАР БОРАИ МУАЛЛИФОН- СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ- INFORMATION ABOUT AUTHORS

TJ	RU	EN
Бердизода Миргул Бердӣ	Бердизода Миргул Берди	Berdizoda Mirgul Berdi
Номзади илмҳои техникӣ, дотсент	Кандидат технических наук, доцент	Candidate of Technical Sciences
Донишгоҳи техникии Тоҷикистон ба номи академик М.С. Осимӣ	Таджикский технический университет имени академика М.С. Осими	Tajik Technical University named after Academician M.S. Osimi
E-mail: mirgul_1989@mail.ru ORCID - 0000-0001-9496-1598		
TJ	RU	EN
Норматов Абдурахмон Юсупович	Норматов Абдурахмон Юсупович	Normatov Abdurakhmon Yusupovich
Номзади илмҳои техникӣ, дотсент	Кандидат технических наук, доцент	Candidate of Technical Sciences
Донишгоҳи техникии Тоҷикистон ба номи академик М.С. Осимӣ	Таджикский технический университет имени академика М.С. Осими	Tajik Technical University named after Academician M.S. Osimi
E-mail: Normatov1949@mail.ru		

НАУЧНО-ПРАКТИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ УПРАВЛЕНИЯ ПРОЧНОСТНЫМИ СВОЙСТВАМИ ЗОЛОСОДЕРЖАЩИХ БЕТОНОВ И ОЦЕНКА ИХ ТЕХНИКО-ЭКОНОМИЧЕСКОЙ ЭФФЕКТИВНОСТИ

А.М. Абдуганиев, А.А.Акрамов, М.Р. Джуракулов

Таджикский технический университет имени академика М.С. Осими, г. Душанбе, Республика Таджикистан

В представленной статье рассматривается применение золы-уноса как инструмента для внесения изменений в строительную отрасль за счёт внедрения инновационного метода повышения прочности бетона. Внедрение золы-уноса в качестве вторичного вяжущего компонента в технологию производства бетона доказывает свою эффективность сразу в нескольких аспектах. Использование данного техногенного сырья позволяет достичь следующих результатов: существенное улучшение физико-механических и эксплуатационных свойств бетонных конструкций; заметное сокращение себестоимости производства за счет экономии первичных связующих веществ; минимизация нагрузки на окружающую среду путем эффективной утилизации промышленных отходов угольной отрасли. Системный подход к изучению свойств золы-уноса и накопленный практический опыт её использования открывают новые возможности для создания устойчивых и долговечных строительных материалов.

Ключевые слова: зола-уноса, бетон, цемент, прочность, устойчивость, минеральная добавка, золошлаковые материалы.

АСОСҲОИ ИЛМИЮ АМАЛИИ ИДОРАКУНИИ ХОСИЯТҲОИ МУСТАҲКАМИИ БЕТОНҲОИ ҲОКИСТАРДОР ВА АРЗЁБИИ САМАРАНОКИИ ТЕХНИКИЮ ИҚТИСОДИИ ОНҲО

А.М. Абдуганиев, А.А.Акрамов, М.Р. Чуракулов

Донишгоҳи техникии Тоҷикистон ба номи академик М.С. Осимӣ, ш. Душанбе, Ҷумҳурии Тоҷикистон

Дар мақолаи мазкур истифодаи ҳокистар-гулхан (зола-унос) ҳамчун воситаи дигаргунсозии соҳаи сохтмон тавассути ҷорисозии усули инноватсионии баланд бардоштани мустаҳкамии бетон мавриди баррасӣ қарор гирифтааст. Истифодаи ин партовҳои саноатӣ ҳамчун ҷузъи дуомилавасткунанда дар технологияи истеҳсоли бетон самаранокии ҳудро дар якҷанд самт собит менамояд. Ба қор бурдани ин ашёи хоми техногенӣ имкон медиҳад, ки натиҷаҳои зерин ба даст оварда шаванд: беҳтаршавии назарраси хосиятҳои физикию механикӣ ва истифодабарии иншооти бетонӣ; коҳиши қобили мулоҳизаи арзиши аслии маҳсулот ба воситаи сарфаи маводҳои аввалияи пайваस्तкунанда; кам кардани таъсири манфӣ ба муҳити зист тавассути қоркарди самарабахши партовҳои соҳаи ангишт. Муносибати мунтазам ба омӯзиши хусусиятҳои ҳокистар-гулхан ва таҷрибаи амалии андӯштасуда ҷиҳати истифодаи он, уфукҳои навро барои сохтани масолеҳи сохтмони устувор ва дарозмуддат боз менамояд.

Калидвожаҳо: ҳокистари ангиштсанг, бетон, семент, мустаҳкамӣ, устуворӣ, иловаҳои минералӣ, масолеҳҳои ҳокистаришлак.

SCIENTIFIC AND PRACTICAL FOUNDATIONS OF CONTROLLING THE STRENGTH PROPERTIES OF FLY ASH CONCRETE AND THE EVALUATION OF ITS TECHNICAL AND ECONOMIC EFFICIENCY

A.M. Abduganiev, A.A. Akramov, M.R. Jurakulov

Tajik Technical University named after Academician M.S. Osimi, Dushanbe, Republic of Tajikistan

This article explores the transformative potential of fly ash within the construction sector, focusing on its role in an innovative methodology for enhancing concrete durability. Integrating fly ash as a supplementary cementitious material (SCM) offers multi-faceted advantages in concrete production technology. The utilization of this industrial byproduct yields the following outcomes: a significant upgrade in the physico-mechanical and operational characteristics of concrete structures; a marked reduction in manufacturing expenses by decreasing the reliance on primary binders; mitigation of environmental impact through the effective recycling of coal industry waste. A systematic analysis of fly ash properties, combined with extensive practical application, paves the way for the development of resilient and sustainable construction materials.

Key words: fly ash, concrete, cement, strength, stability, mineral additive, ash and slag materials. Key words: fly ash, concrete, cement, strength, stability, mineral additive, ash and slag materials.

Введение

Бетон как строительный материал известен с эпохи древнего Египта и на протяжении веков применяется в качестве заполнителя и связующего элемента в конструкциях.

Угольная зола, некогда считавшаяся отходом энергетической отрасли, сегодня активно используется в строительстве, что способствует развитию замкнутого цикла производства и снижению объёмов отходов. История бетона уходит корнями в глубокую древность, его устойчивость и несущая способность со временем значительно повышались.

Практика утилизации угольной золы как побочного продукта энергетического сектора уходит корнями в глубокую древность, когда были зафиксированы первые случаи её использования в строительных целях. Анализ этого многовекового наследия дает возможность по достоинству оценить роль и важность включения зольных отходов в высокотехнологичные процессы современного производства бетона.

Современная индустрия бетона нуждается в инновационных подходах для преодоления актуальных технологических барьеров. Ключевыми задачами здесь выступает не только улучшение прочностных характеристик, но и оптимизация производственных затрат наряду с минимизацией экологического следа. Классические рецептуры бетона базируются на цементе, изготовление которого остается ресурсозатратным и экологически небезопасным процессом. В то же время интенсивное накопление продуктов сжигания угля представляет собой существенную экологическую опасность, обусловленную их токсичным воздействием и огромными площадями отвалов. Детальное изучение данных аспектов подтверждает необходимость внедрения принципов «зеленой» экономики и дает возможность проанализировать перспективы рециклинга зольных отходов в индустрии строительных материалов.

В данной статье сопоставляется экологическая нагрузка от производства стандартного бетона и составов, содержащих зольный остаток. Авторы представили расчеты по снижению углеродного следа (CO_2), которое становится возможным благодаря частичной замене портландцемента продуктами углепереработки. Полученные данные доказывают, что внедрение золосодержащих композитов является эффективным механизмом снижения антропогенного воздействия на воздушную среду при капитальном строительстве.

Исследовательская часть работы охватывает анализ прочностных параметров, реологических свойств смесей, долговечности и экологической безопасности модифицированных бетонов.

Использование отходов угольной промышленности в производстве бетонов обусловлено их способностью выступать в роли активных минеральных компонентов. Это дает возможность существенно сократить затраты на портландцемент без потери качества. Опыт показывает, что лучшие эксплуатационные свойства проявляются у модифицированных бетонов проектного класса В20 и выше.

Приоритетными областями применения такого сырья являются гидротехническое строительство, устройство массивных оснований и дорожное дело. При расчете состава смеси обычно придерживаются нормы ввода золы в количестве 30 – 90 кг/м³. Соблюдение нормативной базы (ГОСТ 25818 – 2017 для зол и ГОСТ 25592 – 91 для шлаков) выступает гарантом надежности конструкций. Помимо традиционных бетонов, мелкодисперсная зола эффективна при создании огнеупорных материалов и специальных связующих составов, а также применяется для упрочнения оснований дорог при работе с грунтами.

При разработке рецептур бетонов различной плотности включение золы-уноса способствует более эффективному распределению расхода портландцемента и минеральных заполнителей. Это одновременно улучшает показатели текучести смесей и увеличивает ресурс эксплуатации готовых элементов. В технологии пористых бетонов неавтоклавного типа кислые зольные фракции выступают качественной заменой кремнеземистого сырья. В то же время составы с высоким содержанием кальция ($\text{CaO} \geq 30\%$) могут использоваться либо как активные добавки, либо как базовый вяжущий элемент. В газобетонном производстве данный вторичный ресурс позволяет частично исключить из состава известь и цемент.

Методы и результаты исследований

Основным материалом является бетон, состоящий из вяжущего – цемент марки М400 цементного завода ООО «Хуаксин Гаюй Цемент», вольского песка, воды и золы угля Фан-Ягнобского месторождения в % от массы цемента. Изготавливали образцы балочки размером 4х4х16 в количестве 20 штук. При приготовлении образцов вводили в состав бетонной смеси 1:3:0,4 (вяжущие: вольский песок:вода) от 0 до 20% золы угля Фан-Ягнобского месторождения. Испытывали образцы на изгиб и сжатие через 1, 3, 7 и 28 сут твердения. Испытание было проведено и для образца состава 1:1,57:2,57:0,4 с введением золы угля Фан-Ягнобского месторождения от 0 до 20% от массы

цемента [4]. Испытания образцов проводили на малогабаритном гидравлическом прессе ПГМ-500МГ4А., НИИ «Строительство и архитектуры». На рисунке 1 показана кинетическая зависимость прочности вяжущего от содержания золы по времени.

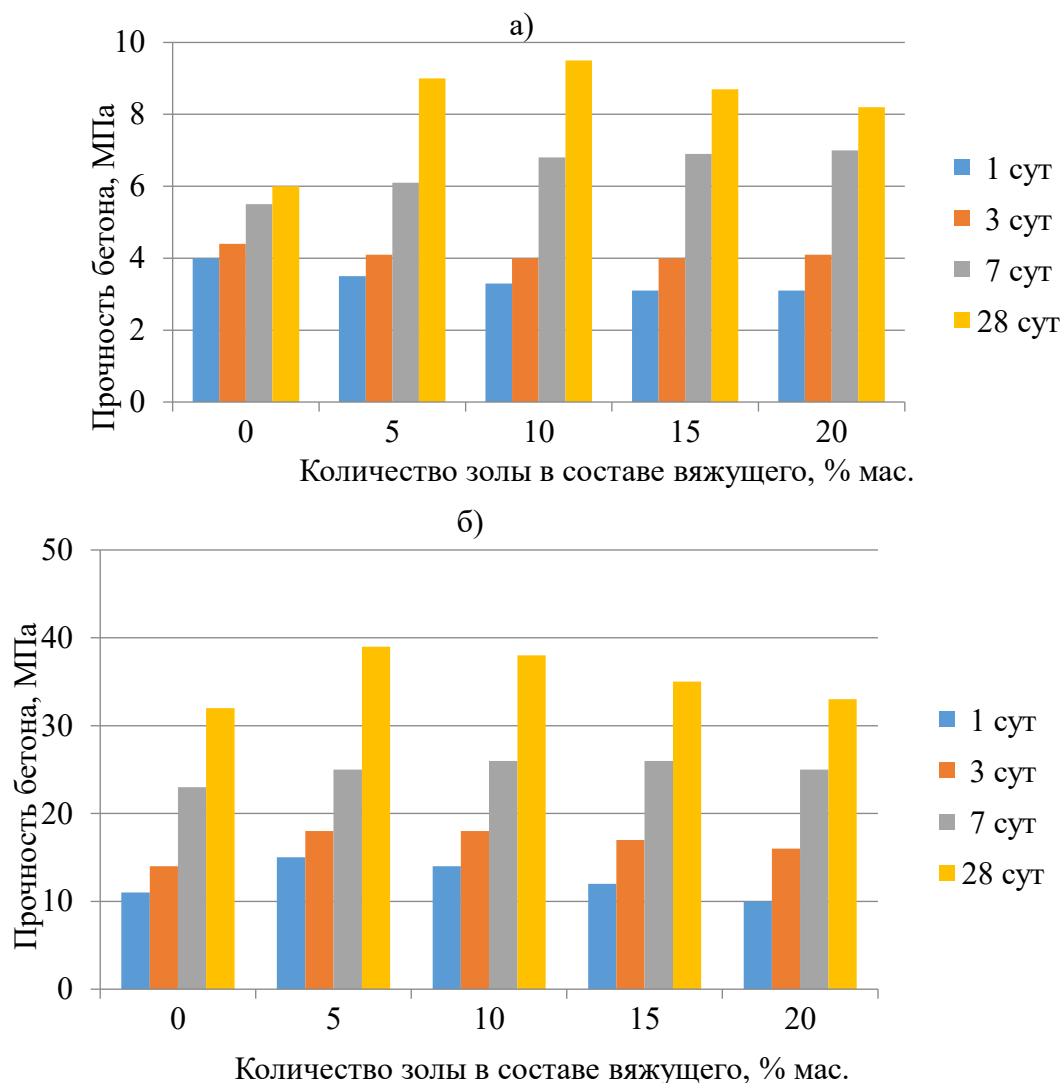


Рисунок 1 – Кинетическая зависимость прочности вяжущего по времени при
а) – изгибе, б) – сжатии

Figure 1 – Kinetic Dependence of Binder Strength on Time:
(a) – Flexural Strength, (b) – Compressive Strength

Оптимальное процентное содержание золы для каждого типа бетона определяется экспериментальным путем. Такой подход, учитывающий специфику применяемого сырья, гарантирует достижение проектных эксплуатационных свойств и обеспечивает надежную защиту стального армирования от коррозии. В железобетонных конструкциях с предварительным напряжением, эксплуатируемых в неагрессивных условиях, концентрация кислой золы не должна превосходить по массе объем используемого портландцемента. Требования к качеству зольного сырья, пригодного для интеграции в бетонные смеси, регламентированы характеристиками, указанными в таблице 1.

Теоретическая часть

Золу-уноса можно классифицировать по трем ключевым признакам: химическому характеру (кислотности), происхождению (виду сжигаемого угля) и качественному виду (категории дисперсности и чистоты от I до IV, см. таблицу 1).

Таблица 1 – Показатели золы-уноса
Table 1 – Fly Ash Parameters

№	Наименование показателя	Вид угля	Значение показателя для вида золы			
			I	II	III	IV
1	Содержание оксида кальция, мас. %:					
	– кислая зола, не более	Для всех	10	10	10	10
	– основная зола, более	Бурий	10	10	10	10
	в том числе свободного CaO, не более:					
	– кислая зола	Для всех	-	-	-	-
	– основная зола	Бурий	5	5	-	2
2	Содержание оксида магния, мас. %, не более	Для всех	5	5	-	5
3	Содержание сернистых и сернокислых соединений в пересчете на SO ₃ , мас.%, не более:					
	– кислая зола	Для всех	3	5	3	3
	– основная зола	Бурий	5	5	6	3
4	Содержание щелочных оксидов в пересчете на Na ₂ O, мас. %, не более:					
	– кислая зола	Для всех	3	3	3	3
	– основная зола	Бурий	1,5	1,5	3,5	1,5
5	Потери массы при прокаливании, мас. %, не более:					
	– кислая зола	Антрацит	20	25	10	10
		Каменный	10	15	7	5
		Бурий	3	5	5	2
	– основная зола	Бурий	3	5	3	3
6	Удельная поверхность, м ² /кг, не менее:					
	– кислая зола	Для всех	250	150	250	300
	– основная зола	Бурий	250	200	150	300
7	Остаток на сите № 008, мас. %, не более:					
	– кислая зола	Для всех	20	30	20	15
	– основная зола	Бурий	20	20	30	15

1). Классификация по химическому составу (кислотности)

Главным критерием деления является содержание оксида кальция (CaO}, которое определяет характер проявления вяжущих свойств:

– кислая зола содержит не более 10% CaO. Она образуется преимущественно при сжигании антрацитов и каменных углей. Обладает выраженными пуццолановыми свойствами (способностью связывать известь в присутствии воды);

– основная зола содержит более 10% CaO. Она происходит от сжигания бурых углей. Обладает не только пуццолановыми свойствами, но и собственной гидравлической активностью (способна самостоятельно схватываться и твердеть при затворении водой).

2). Классификация по технологическим видам (I, II, III, IV)

Показатели удельной поверхности и остатка на сите № 008 разделяют золу на 4 вида, отражающих степень измельчения и чистоту:

Вид IV и I – Высокодисперсные (тонкодисперсные): Имеют удельную поверхность не менее 300 м²/кг (для вида IV) и 250 м²/кг (для вида I). Остаток на сите № 008 минимален (15 – 20%). Это наиболее качественные добавки для тяжелых бетонов (класс А);

Вид II и Вид III — Грубодисперсные, удельная поверхность снижается до 150 – 200 м²/кг, а остаток на сите возрастает до 30%. Такие золы чаще находят применение в легких бетонах (класс Б), где требования к дисперсности ниже.

Химическая активность золы-уноса оценивается по её способности участвовать в процессах гидратации цемента, вступать в пуццолановую реакцию и обеспечивать стабильность объема цементного камня.

Химическая активность золы:

Пуццолановая активность:

- Связывание Ca(OH)₂
- Требуется SiO₂ ≥ 40%

Самостоятельная гидравлическая:

- Свойственна основным золам
- Иницируется свободным CaO

– Зависит от дисперсности

– Ограничена из-за риска деструкции

Химическая активность золы находится в прямой зависимости от ее физического состояния: дисперсности и гранулометрического состава.

Дисперсность (Удельная поверхность) – это химическое взаимодействие между кремнеземом золы и известью цемента, то есть это гетерогенный процесс, протекающий на границе раздела фаз. Чем выше удельная поверхность (у видов I и IV она 250 – 300 м²/кг), тем больше площадь контакта, тем быстрее и полнее протекают пуццолановые реакции в ранние сроки твердения.

Гранулометрический состав в зависимости от назначения: Для тяжелых бетонов (Класс А) требуется высокая плотность, поэтому содержание мелких фракций золы и шлака (менее 0,315 мм) ограничено пределами 20–50 % (см. таблицу 2). Для легких бетонов (Класс Б), где важна пористость и низкая насыпная плотность (менее 1300 кг/м³), допускается вводить до 50–100% мелких фракций, которые работают и как микронаполнитель, и как активный компонент матрицы (см. таблицу 3).

Содержание влаги в зольном остатке лимитируется значением в 1%.

При изготовлении ячеистого бетона зола-унос выступает одновременно в роли вяжущего агента и активного микронаполнителя. В соответствии с требованиями ГОСТ 25485-89, применение золы как основного связующего возможно при условии, что она содержит не менее 40% СаО (из которых свободного оксида кальция – от 16%), до 6% SO₃ и не более 3,5% суммы щелочных оксидов (K₂O и Na₂O). Если же материал используется как кремнеземистый компонент, регламентируются иные нормативы: концентрация SiO₂ должна составлять минимум 45%, в то время как лимиты по кальцию, серному ангидриду и щелочам сужаются до 10%, 3% и 3% соответственно.

Нормативные требования к удельной поверхности золы-уноса устанавливают диапазон от 300 до 350 м²/кг. В составе кислой золы доля стекловидных и сплавленных фаз должна составлять как минимум половину от общего объема. Установлены также жесткие лимиты на потерю массы при прокаливании (ППП): до 3% для бурогоугольного сырья и до 5% для каменноугольного. При этом для бурых углей и антрацитов показатель удельной площади поверхности смещается в сторону более высоких значений – от 400 до 500 м²/кг. Обязательным этапом контроля является проверка материала на равномерность изменения объема. Согласно положениям ГОСТ 2244-85, топливные шлаки могут перерабатываться в пористый песок (фракция до 5 мм), очищенный щебень (5-10, 10-20, и 5-20 мм) или использоваться в виде несепарированной смеси с размером частиц до 20мм. Ключевые физико-химические критерии систематизированы в таблице 2.

Таблица 2 – Требования к гранулометрическому составу фракционированного гравия, шлакового песка и неочищенного шлака

Table 2 – Requirements for the Particle Size Distribution of Fractionated Gravel, Slag Sand, and Unprocessed Slag

Наименование показателя	Фракционированный щебень	Шлаковый песок	Рядовой несортированный шлак
Полные остатки на ситах с диаметром отверстий, соответствующего наименьшему номинальному размеру зерен фракций, мас. %	90–100	–	–
Полные остатки на ситах с диаметром отверстий, соответствующего наибольшему номинальному размеру зерен фракций, мас. %	до 10	до 10	до 10
Содержание зерен, проходящих через сито № 0315, мас. %, не более	5	20	10

Для тяжелых бетонных смесей установлены минимальные пороги объемно-насыпной массы: 1000 кг/м³ для плотного шлакового гравия и 1100 кг/м³ для песка аналогичного типа. Регламент по потерям при прокаливании не распространяется на плотные разновидности шлаков, однако для пористых заполнителей из антрацита и бурого угля действуют ограничения в 7% и 3% соответственно (для железобетонных конструкций нормы ужесточаются до 5% для каменного угля). Химический состав заполнителей лимитирован по содержанию сернистых соединений (до 3% в пересчете на SO₃) и оксида кальция в свободной форме (до 1%).

В вопросах обеспечения долговечности конструкций приоритет отдается показателям структурной устойчивости. Нормативные требования ограничивают допустимую деструкцию при проверке силикатного и железного распада значениями 8% и 5% от общей массы соответственно. Стойкость к отрицательным температурам считается подтвержденной, если после циклического

замораживания (15 циклов для пористых и 100 для плотных фракций) потеря веса не превышает 8%.

Стандарты качества для золошлаковых смесей, применяемых в монолитном и сборном железобетоне, зафиксированы в ГОСТ 25592 – 91 (подробные спецификации отражены в табл. 3).

Таблица 3 – Технические требования к угольным золошлаковым материалам в соответствии с ГОСТ 25592-91
Table 3 – Technical Requirements for Coal Ash and Slag Materials in Accordance with GOST 25592-91

Показатель	Класс А (тяжелые бетоны)	Класс Б (легкие бетоны)
Содержание шлака, мас. %	Не менее 50	До 20
Содержание зерен золы и шлака размером менее 0,315 мм, мас. %:		
	20–30	50–100
	20–50	50–100
Содержание зерен размером более 5 мм, мас. %	Не нормируется	Не более 15
Максимальный размер зерен шлака, мас. %	40	20
Удельная поверхность, м ² /кг	Не нормируется	150–400
Влажность, мас. %	Не более 15	Не более 35
Насыпная плотность в сухом состоянии, кг/м ³	Не менее 1300	Не более 1300
Содержание сернистых и сернокислых соединений в пересчете на SO ₃ , мас. %	Не более 3	Не более 3
- в том числе в сульфидной форме	Не более 1	Не более 1
Количество SiO ₂ , мас. %	Не менее 40	Не менее 40

Обсуждение

Показатели ППП для разных видов угольных отходов (золы и шлака) подлежат строгому контролю. Не допускается отклонение данных характеристик от нормативных максимумов, зафиксированных в соответствующем диаграмме (см. рис. 2).

Максимальные потери массы при прокаливании (ППП) золы-уноса

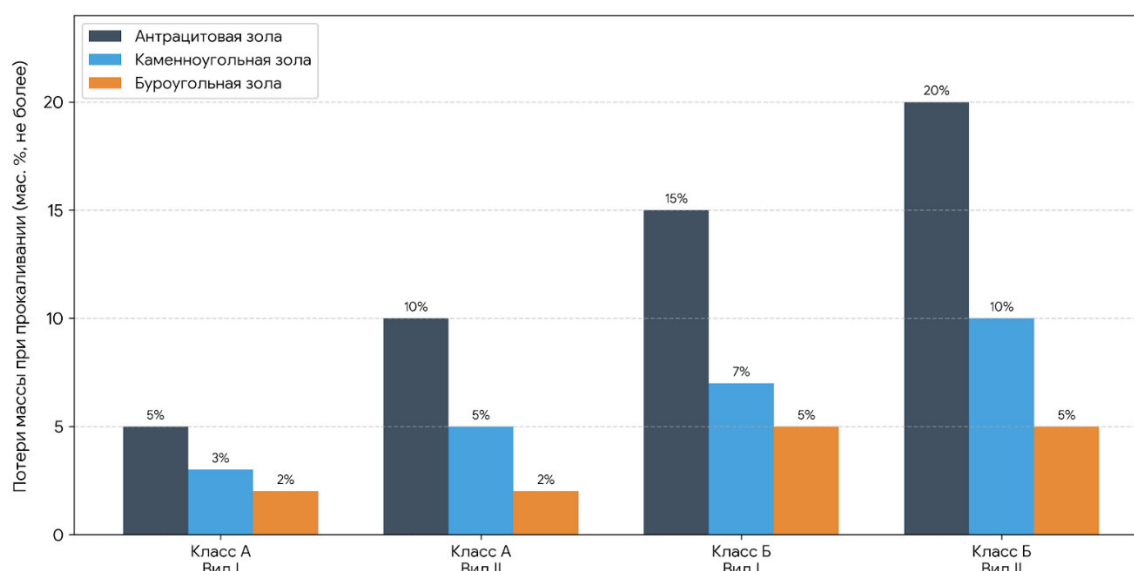


Рисунок 2 – Потеря массы при прокаливании
Figure 2 – Loss of Mass on Ignition

Для достижения необходимого гранулометрического состава продукты сжигания угля подвергаются механической активации в шаровых или вертикально-роликовых мельничных агрегатах. Процесс измельчения считается завершенным, когда остаточная доля на 45 – микронном сите составляет 10 – 30%. Средняя продолжительность помола, как правило, не превышает 1 – 2 часов, корректируясь в зависимости от свойств исходного материала.

В ходе поиска оптимальных пропорций модифицированного бетона проводились испытания с минимальным содержанием зольного остатка от 30% по массе. Анализ данных, полученных в результате 100 контрольных замесов, выявил прямую зависимость между химическим профилем золы (в частности, уровнем кальция) и её предельно допустимым объемом в смеси.

Установлено, что рост концентрации кальция позволяет пропорционально увеличивать количество вводимого вторичного сырья. Это открывает возможности для снижения себестоимости продукции и реализации принципов рационального природопользования. Численные значения этой зависимости приведены на рисунке 3.



Рисунок 3 – Соотношение между содержанием кальция и допустимым процентом золы в Бетоне

Figure 3 – Relationship Between Calcium Content and the Allowable Percentage of Ash in Concrete

Зависимость между химическим составом золы (содержанием CaO) и допустимым уровнем её замещения в бетонном растворе представлена в таблице 5. В частности, если концентрация кальция достигает 30%, оптимальный объем введения добавки составляет от 35% до 40%. Подобная рецептура обеспечивает достижение заданных прочностных параметров и эксплуатационную надежность конструкций.

Фундаментальным условием для реализации заложенного потенциала материала является точное следование технологии перемешивания и соблюдение массовых долей всех ингредиентов. Оценка качества состава базируется на замерах предела прочности на сжатие в контрольные сроки 3 суток и 60 день.

Технологический регламент предусматривает интенсивный набор прочности (до 70% от номинала) в течение первых 72 часов, в то время как оставшийся ресурс прочности в 30% должен быть реализован к завершению второго месяца. Проектирование состава всегда опирается на актуальные требования СНиП, при этом расчетный показатель прочности на сжатие должен быть полностью достигнут именно к 60 – суточному возрасту бетона. Для определения рациональных пропорций портландцемента, инертных заполнителей, воды и золы-уноса следует использовать специализированное программное обеспечение или проверенные отраслевые методики. Рецептура подбирается индивидуально: она варьируется в зависимости от назначения конструкции и тех нагрузок, которые ей предстоит выдерживать в процессе эксплуатации. В рисунке 4 приведены соответствия марок бетона и целевых значений прочности на сжатие.

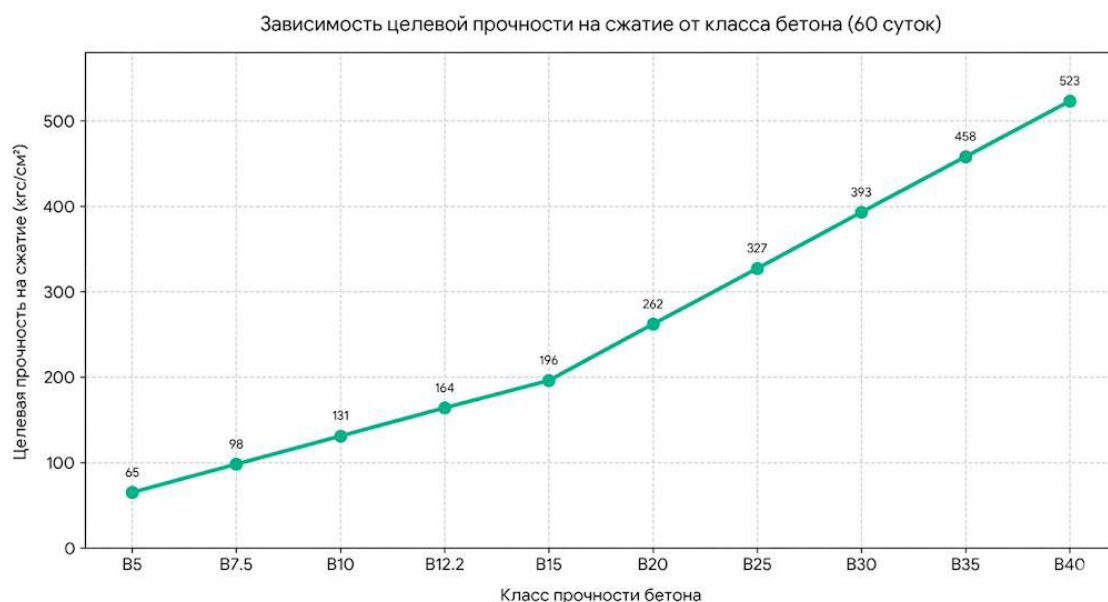


Рисунок 4 – Марки прочности бетона и целевые значения прочности при сжатии

Figure 4 – Concrete Strength Grades and Target Compressive Strength Values

Для оценки качества строительных смесей подготавливаются контрольные образцы в форме кубов, цилиндров или конусов. Испытание их прочности на сжатие осуществляется в лабораторных условиях с помощью гидравлического пресса. В случаях, когда требуется проверка уже готовых монолитных объектов, фрагменты бетона извлекаются путем вырезания или выпиливания. Наиболее распространенным методом отбора кернов является алмазное бурение колонковыми снарядами. Помимо разрушающих испытаний, широко внедряются бесконтактные и неразрушающие способы контроля: ультразвуковая дефектоскопия, метод ударного импульса и другие высокотехнологичные подходы с использованием специализированных приборов.

Частичное замещение портландцемента угольной золой в рецептурах бетона является эффективным инструментом декарбонизации строительства, так как именно производство цементного клинкера генерирует основную массу выбросов парниковых газов. Опираясь на исследовательскую базу, можно утверждать, что интеграция до 30% зольного остатка позволяет предотвратить эмиссию CO_2 в объеме от 0,7 до 1 тонны на каждый кубометр готовой смеси. Данная экологическая преференция достигается путем исключения из состава части углеродоемкого связующего и его замены техногенным сырьем. Математическое подтверждение сокращения углекислотного следа обосновывает целесообразность этой технологии в контексте глобальных климатических инициатив и стратегий устойчивого развития.

Интеграция угольной золы в производство бетона представляет собой перспективную стратегию, сочетающую в себе экономическую целесообразность и принципы экологической безопасности. Глобальные объемы генерации зольного остатка, являющегося следствием работы тепловых электростанций, ежегодно достигают колоссальных масштабов. Данный техногенный побочный продукт создает серьезные логистические и экологические трудности, связанные с его утилизацией и потенциальной опасностью для природы. Длительное складирование значительных масс золы на полигонах в черте жилых зон формирует долгосрочные риски для локальных экосистем и благополучия населения.

В мировом масштабе территории, занятые отвалами продуктов сжигания угля, сопоставимы с площадью небольших государств. Общий объем накопленных отходов исчисляется миллиардами тонн, а энергетическая отрасль продолжает ежегодно пополнять эти запасы миллионами тонн свежих поступлений. Критическое заполнение существующих площадок и ужесточение экологических нормативов ставят ТЭС перед жестким выбором: инвестировать огромные средства в системы утилизации или консервировать мощности из-за дефицита мест для складирования.

Рациональным выходом из сложившейся ситуации служит вовлечение золы-уноса в цикл производства строительных материалов, в частности – бетонных растворов. Такой подход реализует двойную выгоду: освобождает земли от техногенных свалок и снижает потребность в добыче первичных недр. Данная модель является классическим примером циркулярной экономики, где отходы одного сектора становятся ценным ресурсом для другого. Более того, использование золы повышает качественные характеристики бетона и способствует развитию тренда «зеленого» строительства.

Экономическая целесообразность использования золы в бетоноведении подтверждается расчетами. Поскольку доля портландцемента в структуре себестоимости бетонной смеси составляет около 35%, замена даже четверти этого объема зольным остатком позволяет снизить итоговые затраты на 8 – 9%. При средней стоимости кубометра бетона в 400 сомони (где расходы на цемент составляют до 80% от этой суммы), внедрение золы-уноса снижает себестоимость на 8%. В результате чистая экономия достигает примерно 70 сомони на каждый кубический метр произведенного материала, что существенно повышает конкурентоспособность предприятия.

Ниже приведен расчет экономической эффективности введения золы уноса в состав бетонной смеси.

Исходные данные для расчета: средняя стоимость 1 м³ бетона – 400 сомони; доля портландцемента в себестоимости бетона – 35 %; доля расходов на цемент от общей стоимости: до 80 %; процент снижения себестоимости при внедрении золы-уноса – 8 %; объем замены цемента зольным остатком – 25 % (четверть объема).

1. Расчет базовых показателей (без применения золы): сначала определим затратную часть на закупку вяжущего (цемента) в структуре стоимости одного кубического метра готовой продукции:

$$\text{Расходы на цемент} = 400 \text{ сомони} \times 0,80 = 320 \text{ сомони/м}^3$$

2. Расчет экономического эффекта (с применением золы): поскольку замена четверти объема цемента золой-уноса позволяет снизить итоговую себестоимость производства на 8 %, то определим размер чистой экономии на кубический метр:

$$\text{Экономия на 1 м}^3 = 400 \text{ сомони} \times 0,08 = 32 \text{ сомони/м}^3$$

3. Итоговые показатели эффективности: прямое снижение себестоимости – 8 %: итоговая чистая экономия (с учетом сопутствующих факторов) – до 70 сомони на каждый кубический метр произведенного материала

Это указывает на то, что замена 25 % портландцемента золой-уноса является высокоэффективным решением для строительного сектора в Республике Таджикистан, существенно повышающим рентабельность производства и конкурентоспособность предприятия на рынке.

Переход на использование золы-уноса в производстве строительных растворов обеспечивает двойной эффект: существенную экономию средств и эффективную переработку промышленных побочных продуктов. Сегодня это один из наиболее действенных инструментов конкурентной борьбы. Высокая инвестиционная привлекательность метода обусловлена балансом между прибылью и принципами экологической безопасности.

Основные выводы исследования, включая данные по сокращению эмиссии CO₂ и повышению доходности производства, предоставлены в распоряжение ключевых партнеров. Полученные результаты наглядно обосновывают целесообразность модернизации технологических процессов. Внедрение подобных решений укрепляет парадигму устойчивого развития в строительной индустрии, способствуя защите природного капитала и созданию экологически чистой городской среды.

Заключение

Резюмируя вышеизложенное, следует констатировать, что предложенный способ модификации бетона с помощью золы-уноса полностью оправдал ожидания. Данная технология демонстрирует комплексный положительный эффект, выражающийся в сокращении производственных затрат, качественном улучшении структурных характеристик смеси и снижении антропогенного давления на экосистему. Применение отходов промышленности в качестве

частичного заменителя вяжущего позволило оптимизировать сметную стоимость строительства, что делает готовое жилье и инфраструктуру более доступными для населения.

*Рецензент: Хасанзода Н.М. - д.т.н., и.о. профессора кафедры «Основания, фундаменты и подземные сооружения»
ПГПУ им. акад. М. Осими.*

Литература

1. Золошлаковые отходы. Часть 1: На пороге экологического коллапса // Медиациентр ИХТЦ. – 2016. – URL: <https://ect-center.com/mediacenter/kuda-devat-zolu-zoloshlakovyey-otkhody-kak-ugroza-ekologii> (дата обращения: 18.05.2026).
2. Производителям бетонов и растворов // ООО «СЛК Цемент». – URL: http://слк.рф/?page_id=281 (дата обращения: 18.05.2026).
3. Мехта, П. К. Бетон: Микроструктура, свойства и материалы. / Мехта, П. К., и Монтейру, П. Дж. М. // Образование 2014. Макгроу-Хилл. С. 127–133
4. Миндесс С. Бетон. Прентис-холл. / Миндесс С., Янг Дж. Ф. и Дарвин Д. // Технологии бетонов 2003. С. 92–99.
5. Малхотра, В. М. Пуццолановые и цементирующие материалы. / Малхотра, В. М., и Мехта, П. К. // CRC-пресс. 2006. С. 121–125.
6. Томас, доктор медицинских наукР. / Использование побочных продуктов сжигания угля в экологически чистом бетоне. // Томас, доктор медицинских наук, и Гупта, Р. Издательство "Вудхед Пабблишинг". 2013. С. 162–173
7. Гартнер, Э. Интересные с промышленной точки зрения подходы к получению цементов с низким содержанием CO₂ / Гартнер, Э. // Исследование цемента и бетона. 2004. 34 (9), С. 1489-1498.
8. Лотенбах Б. Дополнительные цементирующие материалы. / Лотенбах Б., Скривнер К. и Хутон Р. Д. // Исследование цемента и бетона. 2011. 41 (12), 1244-1256.
9. Ши, К. Утилизация угольной золы для производства экологически чистого бетона / Ши, К., и Цянь, Дж. // Журнал экологически чистого производства. 2017. №149, С. 1142-1157.
10. Акрамов А.А. Возможные пути утилизации золы угля для производства строительных материалов / Шарифов А., Акрамов А.А., Субхонов Д.К., Шодиев Г.Г., Улукханов Ал.А., Ахмадов Ш.И. // Материалы республиканской научно-практической конференции «Развитие архитектуры, строительства и производства строительных материалов», (25 апреля 2015 г.) г. Худжанд, 2015. – С. 185-188.
11. Акрамов А.А. Влияние количества добавки золы-уноса на механическую прочность цементного камня / Шарифов А., Акрамов А.А., Муминов А.К. Акрамова З.А. Акрамова Ф.А. // Материалы республиканской научно-практической конференции «Современные задачи градостроительства и архитектуры» (27 ноябрь 2019) г. Душанбе, С. 253-257.
12. Акрамов А.А. Модифицирование цемента золой угля Фан-Ягнобского месторождения для повышения прочности бетона / Шарифов А., Акрамов А.А.Назирова Я.Г.Муминов А.К.Ахмедов М.Ф. // Политехнический вестник, Серия: Инженерные исследования 1(57)-2022. – С. 157–163.

References

1. Ash and Slag Waste. Part 1: On the Verge of an Environmental Collapse // Media Center of the Engineering Chemical Technology Center (ECT Center). – 2016. – URL: <https://ect-center.com/mediacenter/kuda-devat-zolu-zoloshlakovyey-otkhody-kak-ugroza-ekologii> (accessed: 18.05.2026).
2. For Concrete and Mortar Manufacturers // SLK Cement LLC. – URL: http://слк.рф/?page_id=281 (accessed: 18.05.2026).
3. Mehta, P.K., Monteiro, P.J.M. Concrete: Microstructure, Properties, and Materials. McGraw-Hill Education, 2014, pp. 127–133.
4. Mindess, S., Young, J.F., Darwin, D. Concrete. Prentice Hall, 2003, pp. 92–99.
5. Malhotra, V.M., Mehta, P.K. Pozzolanic and Cementitious Materials. CRC Press, 2006, pp. 121–125.
6. Thomas, M.D.A., Gupta, R. Use of Coal Combustion By-Products in Sustainable Concrete. Woodhead Publishing, 2013, pp. 162–173.

7. Gartner, E. Industrially Interesting Approaches to Low-CO₂ Cement Production. Cement and Concrete Research. 2004, Vol. 34, No. 9, pp. 1489–1498.
8. Lothenbach, B., Scrivener, K., Hooton, R.D. Supplementary Cementitious Materials. Cement and Concrete Research. 2011, Vol. 41, No. 12, pp. 1244–1256.
9. Shi, C., Qian, J. Coal Ash Utilization for Sustainable Concrete Production. Journal of Cleaner Production. 2017, No. 149, pp. 1142–1157.
10. Akramov, A.A., Sharifov, A., Subkhonov, D.K., Shodiev, G.G., Ulukhanov, A.A., Akhmadov, Sh.I. Possible Ways of Coal Ash Utilization for the Production of Construction Materials. In: Proceedings of the Republican Scientific and Practical Conference “Development of Architecture, Construction and Production of Building Materials”, Khujand, April 25, 2015, pp. 185–188.
11. Akramov, A.A., Sharifov, A., Muminov, A.K., Akramova, Z.A., Akramova, F.A. Influence of Fly Ash Addition Amount on the Mechanical Strength of Cement Stone. In: Proceedings of the Republican Scientific and Practical Conference “Modern Problems of Urban Planning and Architecture”, Dushanbe, November 27, 2019, pp. 253–257.
12. Akramov, A.A., Sharifov, A., Nazirov, Ya.G., Muminov, A.K., Akhmedov, M.F. Modification of Cement with Coal Ash from the Fan-Yagnob Deposit to Increase Concrete Strength. Polytechnic Bulletin. Series: Engineering Research. 2022, No. 1(57)., pp. 157–163.

МАЪЛУМОТ ДАР БОРАИ МУАЛЛИФОН- СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ- INFORMATION ABOUT AUTHORS

TJ	RU	EN
Абдуганиев Абдумачид Мамасодиқович	Абдуганиев Абдумаджид Мамасодиқович	Abduganiev Abdumadzhid Mamasodikovich
муаллими калон	Старший преподаватель	senior lecturer
Донишгоҳи техникии Тоҷикистон ба номи академик М.С. Осимӣ	Таджикский технический университет им. акад. М.С. Осими	Tajik Technical University named after Acadtmician M.S. Osimi
E-mail: shahboz04@mail.ru		
0009-0007-7879-6984		
TJ	RU	EN
Акрамов Авазҷон Абдуллоевӣ	Акрамов Авазжон Абдуллоевич	Akramov Avazjon Abdulloevich
Номзади илмҳои техники, дотсент	Кандидат технических наук, доцент	Candidate of technical sciences, assistant professor
Донишгоҳи техникии Тоҷикистон ба номи академик М.С. Осимӣ	Таджикский технический университет им. акад. М.С. Осими	Tajik Technical University named after Acadtmician M.S. Osimi
E-mail: akramov.avaz@mail.ru		
0000-0002-7084-9128		
TJ	RU	EN
Ҷуракулов Муродали Роҳатовӣ	Джуракулов Муродали Роҳатович	Jurakulov Murodali Rohatovich
Номзади илмҳои техники, и.в. дотсент	Кандидат технических наук, и.о. доцента	Candidate of Technical Sciences, Acting Associate Professor
Донишгоҳи техникии Тоҷикистон ба номи академик М.С. Осимӣ	Таджикский технический университет им. акад. М.С. Осими	Tajik Technical University named after Acadtmician M.S. Osimi
E-mail: murodali1969@gmail.ru		
0000-0003-3604-8682		

ОСОБЕННОСТИ АКУСТИЧЕСКОЙ РЕКОНСТРУКЦИИ ОТКРЫТОГО ТЕАТРА

А.Р. Фазилов

Таджикский технический университет имени академика М.С. Осими, г. Душанбе, Республика Таджикистан

Статья посвящена вопросу акустической реконструкции открытого театра на примере открытого театра по улице Исмоили Сомони в г. Душанбе. Приведены основные критерии оценки акустических условий в залах зрелищных зданий, а также особые подходы, способы формирования благоприятной акустической среды в открытых театрах. Проведены работы по обследованию и анализу существующего состояния архитектурно-планировочного решения и пластики внутренних поверхностей ограждающих конструкций рассматриваемого открытого театра, выполнены соответствующие расчеты существующих акустических условий в театре. Приведены результаты выполненных работ, по результатам которых сделан вывод о том, что рассматриваемый театр по основным акустическим параметрам не обеспечит формирование благоприятной акустической обстановки и требуется проведение соответствующей акустической реконструкции. По результатам выполненных работ разработаны рекомендации по акустической реконструкции рассматриваемого открытого театра.

Ключевые слова: акустика, театр, реконструкция, структура отражений, реверберация, диффузность, артикуляция.

ХУСУСИЯТҲОИ ХОСИ ТАҶДИДИ АКУСТИКИИ ТЕАТРИ КУШОДА

А.Р. Фазилов

Донишгоҳи техникии Тоҷикистон ба номи академик М.С. Осимӣ, ш. Душанбе, Ҷумҳурии Тоҷикистон

Мақола ба масъалаи таҷдиди акустикии театри кушода дар мисоли театри кушода, воқеъ дар кучаи Исмоили Сомони ш. Душанбе бахшида шудааст. Дар мақола нишондиҳандаҳои асосии баҳодиҳии шароити акустикӣ дар толорҳо, инчунин усулҳои ташаккули муҳити мусоиди акустикӣ дар театрҳои кушода оварда шудаанд. Корҳо онди муоина ва таҳлили ҳалли меъмориву-тарҳӣ ва ҳолати сатҳи дохилии конструкцияҳои ихтосавӣ гузаронида шуда, ҳисобҳои мувофиқи муҳити акустикии мавҷуда барои театр анҷом дода шудаанд. Инчунин, натиҷаи корҳои иҷрогардида оварда шудаанд ва аз рӯи натиҷаи онҳо ҳулоса карда шуд, ки театри баррасишаванда аз рӯи параметрҳои акустикӣ ташаккули мусоиди муҳити акустикиро таъмин карда наметавонад ва таҷдиди мувофиқи акустикӣ зарур мебошад. Дар асоси натиҷаҳои корҳои иҷрогардида тавсияҳо барои таҷдиди акустикии театри кушода таҳия карда шудаанд.

Калидвожаҳо: акустика, театри кушода, таҷдид, сохтори инъикосҳо, ревербератсия, диффузнокӣ, артикулятсия.

FEATURES OF ACOUSTIC RECONSTRUCTION OF AN OPEN THEATRE

A. R. Fazilov

Tajik Technical University named after Academician M.S. Osimi, Dushanbe, Republic of Tajikistan

This article examines the acoustic renovation of an open-air theater, using the open-air theater on Ismoili Somoni Street in Dushanbe as an example. It presents the key criteria for assessing acoustic conditions in theater halls, as well as specific approaches and methods for creating a favorable acoustic environment in open-air theaters. A survey and analysis of the existing architectural layout and the interior surfaces of the open-air theater's enclosing structures were conducted, and corresponding calculations of the existing acoustic conditions were performed. The results of the work are presented, concluding that the theater, based on its key acoustic parameters, does not provide a favorable acoustic environment and requires appropriate acoustic renovation. Based on these findings, recommendations for the acoustic renovation of the open-air theater were developed.

Keywords: acoustics, open-air theater, reconstruction, reflection structure, reverberation, diffusion, articulation.

Введение

Театр – это одно из достопримечательностей любого древнего и современного города, является центром притяжения и культурной жизни в системе градостроительной застройки.

Открытые театры, появление и возведение которых восходит к глубокой древности, заслуживают внимания и интерес простотой и логикой пространственного решения, хорошими акустическими качествами, свидетельствующими о глубоких знаниях зодчих древности закономерностей распространения звуков в атмосфере.

Средства, при помощи которых античные зодчие достигали хорошей акустики, по своему характеру можно разбить на два вида: первый связан с выбором места строительства, с учетом особенностей атмосферной акустики; второй — с использованием отраженной звуковой энергии, для создания оптимального звукового поля.

Целью настоящей работы является исследование условий формирования акустического режима при реконструкции открытого театра (амфитеатра) по улице Исмоили Сомони в г. Душанбе.

Вместимость реконструируемого открытого театра - 1400 чел. К особенностям зала открытого театра можно отнести то, что он представляет собой полуоткрытый зал (открыта

центральная часть потолка), а также его многофункциональность. Решение театра в виде полуоткрытого зала требует учета акустических требований, предъявляемых как к закрытым, так и открытым залам. Функциональное назначение зала амфитеатра – речевые и музыкальные представления со звукоусилением и без него; звуковое сопровождение кинофильмов и т.д.

Материалы и методы исследования

Основными показателями акустической обстановки в залах являются: качество отражений звуков от внутренних поверхностей (однократные отражения); количественная характеристика времени реверберации; уровень диффузности звукового поля и артикуляция речи.

Наряду с этим акустическое проектирование открытых театров в дополнение к отмеченным выше требованиям (показателям) имеет свои особые подходы, способы формирования благоприятной акустической среды.

В частности, хорошая акустика открытых театров достигается совокупностью следующих архитектурных и конструктивных средств и факторов, обусловленных следующими параметрами:

- а) выбор места строительства с учетом особенностей атмосферной акустики:
 - использование местности для размещения амфитеатра (с нужным углом подъёма) на естественном основании;
 - окружение чаши амфитеатра широкой полосой зелени, насыпями и т.п., защищающими её от внешних (городского и транспортного) шумов;
 - удаление от высоких естественных преград или строений, могущих создать эхо, фокусирование или вредные звуковые отражения;
 - учёт особенностей атмосферной акустики;
 - б) использование отраженной звуковой энергии:
 - максимальное сохранение естественности звучания;
 - максимальное приближение слушателей к сцене;
 - отсутствие преград на пути распространения прямых и отраженных звуков;
 - форма и отделка сцены, способствующие полному использованию отраженных звуков для улучшения слышимости;
 - проектирование сцены в виде акустической раковины;
 - применение опрокинутых открытой частью вниз сосудов по типу резонаторов Гельмгольца (голосники), резонирующие на звуки определенной частоты и способствующие оживлению звучания;
 - устройство резонирующей галереи по периметру амфитеатра по типу резонаторов Гельмгольца.
- Акустическое проектирование реконструируемого открытого театра должно включать:
- оценку габаритов и формы амфитеатра при соблюдении общих требований к объемно-планировочному решению зала;
 - проверку достоверности оценки акустики зала по статистической теории;
 - расчет частотной характеристики времени реверберации зала;
 - графический анализ чертежей зала с требуемой корректировкой проекта в части формы и очертаний его ограждающих конструкций;
 - разработку мероприятий по улучшению диффузности звукового поля;
 - расчет акустических показателей для установления соответствия их зонам оптимальных значений;
 - оценку шумового режима театра с разработкой необходимых мероприятий по его улучшению.

При акустическом проектировании открытых театров необходимо учитывать: особенности распространения звука в различных атмосферных условиях; акустические характеристики окружающей местности (шумовой фон, эпизодические шумы и т.д.); универсальность назначения открытых театров, используемых для концертных, оперно-драматических, хореографических, хоровых выступлений, демонстраций кинофильмов и т.д. При распространении сферических волн от точечного источника звука разница в уровнях звукового давления ΔL в точках, находящихся от источника на расстоянии l_1 и l_2 , определяется по формуле

$$\Delta L = 20 \lg(l_1/l_2), \text{ дБ.}$$

Результаты исследования и выводы

Результаты обследования и анализа существующего состояния архитектурно-планировочного решения и пластики внутренних поверхностей ограждающих конструкций приведены на рисунке 1 и в таблице 1.

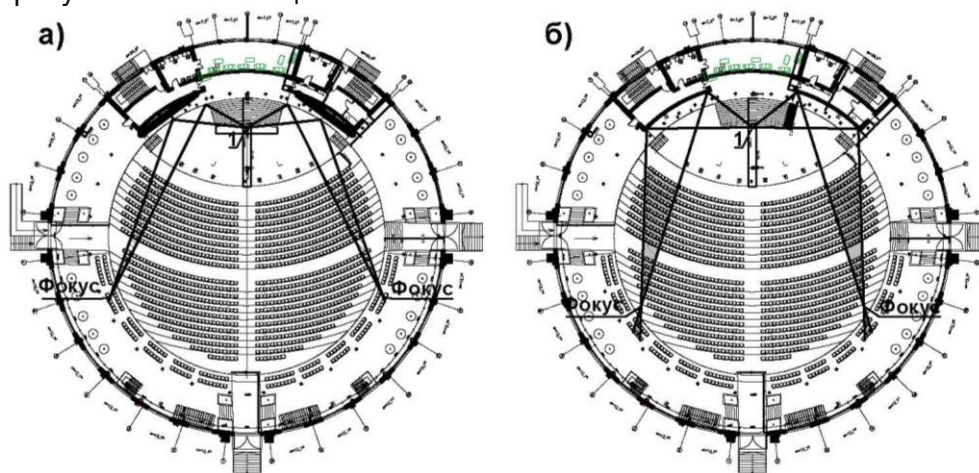


Рисунок 1 - План зала открытого театра до реконструкции с однократными отражениями от боковых стен вблизи сцены (а) и с однократными отражениями от нижней зрительской части боковых стен (б)

Figure 1 – Plan of the Open-Air Theater Hall Before Reconstruction with Single Reflections from the Side Walls Near the Stage (a) and Single Reflections from the Lower Audience Area of the Side Walls (b)

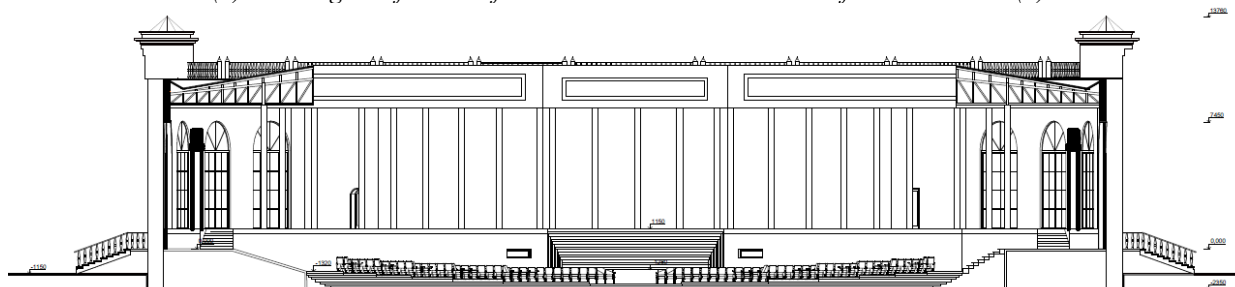


Рисунок 2 – Поперечный разрез зала театра с видом на сцену
Figure 2 – Cross-Section of the Theater Hall with a View Toward the Stage

На рисунке 1 показаны точки, где возможно образование фокусов звуков.

С учетом анализа и учета данных таблицы 1 следует отметить, что в зале будут формироваться неудовлетворительные акустические условия [3, 6, 7].

Основные факторы, являющиеся причиной неблагоприятной акустики рассматриваемого открытого театра и невыполнения основных акустических критериев, приведены в таблице 1.

Таблица 1 - Существующие условия акустического режима и проблемы, возникающие в зале

№ пп	Параметр зала	Характеристика (величина)	Акустические недостатки	Возможность устранения недостатков
1	Форма зала в плане	круглая	а) фокусирование звука; б) появление эха; в) обратные звуки, отражающиеся от задних, торцовых стен; г) в зоне галереи шириной 5,0 м за счет многократных отражений образуется чрезмерно гулкое звуковое поле	а) акустическая реконструкция; б) изменение акустической отделки и конфигурации внутренних стен
2	Габаритные размеры:			

№ пп	Параметр зала	Характеристика (величина)	Акустические недостатки	Возможность устранения недостатков
	а) длина, м	42,0	длина зала превышает оптимальную, равную 30,0-34,0 м для рассматриваемой вместимости зала	корректировка пластики внутренних поверхностей стен
	б) ширина, м	54,0	ширина превышает оптимальную, равную величине не более длины зала	корректировка пластики внутренних поверхностей стен
	в) высота, м	10,0	приемлема	-
3	Объем, м ³	21249,6	оптимальный объем из расчета 4-6 м ³ /чел. должен составлять 6х1400=8400 м ³	изменить функциональное использование периметральной галереи
4	Пластика внутренних поверхностей стен	Вогнутая криволинейная поверхность	а) существует опасность концентрации отражений звуков, фокусирование отраженных звуков и образование эха	корректировка пластики внутренних поверхностей стен
			б) однократные отражения от боковых стен скользят вдоль стены, не попадая в среднюю часть зала	изменение конфигурации внутренних стен
			в) значительная раскрытость боковых стен около сцены способствует неравномерному распределению отражений	изменение конфигурации внутренних стен
			г) криволинейные поверхности стен галереи способствуют большому запаздыванию отражений	изменение конфигурации внутренних стен
			д) неудачная форма потолка над сценой не способствует оптимальному распределению отражений.	изменение акустической отделки потолка
			е) образуются сильно запаздывающие отраженные звуки	изменение акустической отделки внутренних поверхностей
			ж) задняя стена фокусирует отраженные звуки, создавая отчетливое эхо в передних рядах	изменение акустической отделки внутренних поверхностей
			и) в передние ряды приходят и вторые отражения с большим временем запаздывания, нарушая слышимость	изменение акустической отделки внутренних поверхностей
			к) от части потолка над сценой возникают нежелательные обратные отражения в сторону сцены	изменение акустической отделки внутренних поверхностей
			л) отражения звуков от задней поверхности стен аръерсцены сильно запаздывают по отношению к прямым звукам и приводят к появлению многочисленных эхо в различных зрительских местах зала	изменение акустической отделки внутренних поверхностей с применением звукопоглощающих и звукоотражающих материалов и конструкций, а также способствующих улучшению диффузности звукового поля
			В галерее за счет многократных отражений от стен и потолка и сильного запаздывания образуется чрезмерная гулкость	отделка внутренних поверхностей с применением звукопоглощающих материалов и конструкций
5	Время реверберации		на частотах от 250 до 2000 Гц превышает допустимую величину в среднем на 20%	необходимо проверить расчетом
6	Диффузность звукового поля		не обеспечена	изменение конфигурации внутренних поверхностей стен с членением на отдельные элементы малых размеров, изменение акустической отделки внутренних поверхностей с применением

№ пп	Параметр зала	Характеристика (величина)	Акустические недостатки	Возможность устранения недостатков
				звукопоглощающих и звукоотражающих материалов и конструкций
7	Артикуляция (разборчивость речи)		низкая разборчивость вдоль боковых стен	акустическая реконструкция

Из таблицы 1 видно, что существующая форма зала и кривизна внутренних поверхностей не позволяют улучшить акустические условия в зале. При этом в процессе реконструкции театра путем акустического проектирования можно добиться устранения отдельных акустических дефектов и улучшить акустическую обстановку.

Обсуждение

Подробно рассмотрены пути улучшения акустического режима в театре, исключения неблагоприятных акустических дефектов, формирования акустических условий, обеспечивающих соответствие основным акустическим требованиям. Хорошая акустика открытых театров зависит от:

- правильного выбора площадки для возведения открытого театра;
- соответствующего акустического проектирования с учетом всех действующих требований и основных акустических критериев.

Учитывая, что Республика Таджикистан характеризуется жарким климатом, проектирование и возведение открытых театров (амфитеатров) имеют хорошие перспективы в будущем. В связи с этим результаты настоящей работы могут явиться хорошим ориентиром для применения в градостроительной практике.

Заключение

По результатам проведенных исследований, выполненных расчетов и обследования архитектурно-планировочного решения и пластики внутренних поверхностей ограждающих конструкций рассматриваемого открытого театра сделан вывод о том, что рассматриваемый театр по основным акустическим параметрам не отвечает действующим требованиям и необходимо проведение соответствующей акустической реконструкции.

Исходя из этого, для обеспечения оптимальных условий акустического режима в амфитеатре разработаны следующие рекомендации (см. рисунки 3 и 4):

1) Изменение конфигурации (криволинейное вогнутое очертание) нижней части боковой стены около сцены, путем её замены на плоскую стену, и созданием акустического экрана Эк1 (см. рисунок 3). Серьезными недостатками существующей стены являются:

- незначительная эффективная зона полезных ранних отражений;
- появление фокусов, а впоследствии и эха;
- полезные ранние отражения звуков при расположении источника звука в аррьерсцене направлены в зону, где отсутствуют зрительские места, т.е. эффективность равна нулю. Кроме того, в пустой галерее будет возрастать гулкость, создавая тем самым шум.

Из рисунков 3 и 4 видно, что данное мероприятие позволит:

- существенно увеличить эффективную зону полезных ранних отражений;
- исключить появление фокусов, а впоследствии и эха.

При этом следует отметить, что наибольшая эффективность акустического экрана Эк1 достигается при расположении источника звука на аррьерсцене.

2) В части боковой стены, располагающейся ниже галереи следует стены круглой формы заменить на стену ломаного профиля и создать плоские акустические экраны Эк2 - Эк6 (см. рисунок 3). Серьезными недостатками существующей стены являются:

- незначительная эффективная зона полезных ранних отражений;
- появление фокусов, а впоследствии и эха.

При периодическом изменении положения источника звука, фокус (эхо) будет возникать в различных точках зала.

Из рисунков 3 и 4 видно, что данное мероприятие позволяет решить следующие задачи:

- существенно увеличить эффективную зону полезных ранних отражений;
- исключить появление фокусов, а впоследствии и эха.

3) Для эффективной работы акустических экранов Эк2 –Эк6, эти экраны в пределах секторов А и Б следует продолжить выше отметки пола галереи на величину 500 мм и выполнить из того же материала, что и нижняя часть этих акустических экранов Эк2 – Эк6.

4) Отделка звукопоглощающими материалами и/или конструкциями криволинейной вогнутой конфигурации части стены за арьерсценой. Серьезными недостатками существующей стены являются:

- чрезмерное запаздывание отраженных звуков, что приведет к появлению эха;
- появление обратных звуков, нарушающих условия слышимости звука.

При периодическом изменении положения источника звука (за исключением расположения источника арьерсцене), фокус (эхо) будет возникать в различных точках зала.

Данное мероприятие позволяет решить следующие задачи:

- исключить появление эха и обратных сильно запаздывающих звуков;
- создание оптимального реверберационного процесса;
- обеспечение диффузности звукового поля;
- обеспечение артикуляции (разборчивости) речи.

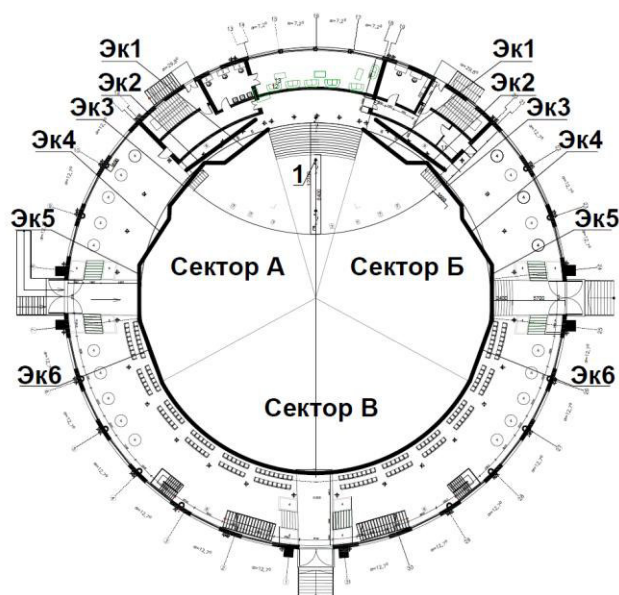


Рисунок 3 - Размещение акустических плоских экранов Эк1 – Эк6 на уровне партера и зона эффективных отражений звуков от проектируемых экранов (сектора А, Б и В)

Figure 3 – Arrangement of Acoustic Flat Screens E1–E6 at the Parterre Level and the Zone of Effective Sound Reflections from the Designed Screens (Sectors A, B, and C)

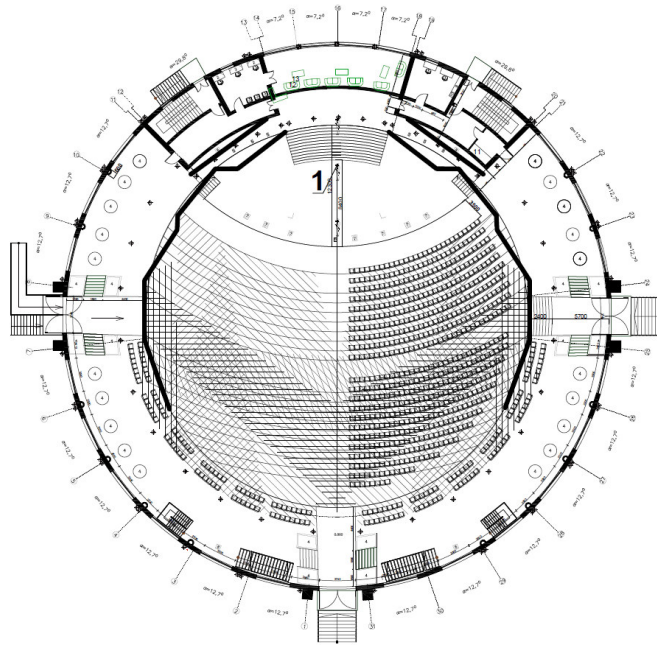


Рисунок 4 - Размещение плоских акустических экранов

Эк1 – Эк6 на уровне пола галереи и зона эффективных отражений звуков от проектируемых экранов

Figure 4 - Placement of flat acoustic panels Ek1 – Ek6 at the gallery floor level and the zone of effective sound reflections from the projected panels

5) Акустическую отделку внутренних поверхностей зала следует выполнить преимущественно конструкциями из звукопоглощающих материалов и изделий с последующим расчетом времени реверберации и сравнением с оптимальной величиной.

6) При акустической отделке внутренних поверхностей зала следует учесть необходимость обеспечения диффузности звукового поля, что требует расчленения внутренних поверхностей на отдельные выступающие элементы.

7) По результатам выполненных расчетов и принятых конструктивных решений следует дать оценку артикуляции (разборчивости) речи.

8) Предложенное в рекомендациях новое проектное решение рассматриваемого открытого театра со зрительскими местами следует считать более оптимальным как с точки зрения акустики, так и условий видимости и зрительного восприятия.

Рецензент: Умарзода У.Х. – к.т.н., первый заместитель председателя Комитета по архитектуре и строительству при Правительстве Республики Таджикистан

Литература

1. СП 415.1325800.2018. Здания общественные. Правила акустического проектирования. Москва, 2018. Утвержден приказом Министерства строительства и жилищно-коммунального хозяйства Российской Федерации от 15 ноября 2018 г. №728/пр и введен в действие с 16 мая 2019 г. – 33 с.
2. Межгосударственные строительные нормы МСН 2.04-03-2003 (СНиП 23-03-2003) «Защита от шума». НИИСФ РААСН. -М.: ФГУП ЦПП. С. 34.
3. Руководство по акустическому проектированию залов многоцелевого назначения средней вместимости. НИИСФ Госстроя СССР. 2-е издание., исправл. и доп. -М., 1981. С. 47.
4. Строительные нормы и правила Республики Таджикистан СНиП РТ 31–02–2022 «Общественные здания и сооружения» / Комитет по архитектуре и строительству при Правительстве Республики Таджикистан. – Душанбе: ГУП «НИИСА» /Издательство: «Издательский центр», 2023 г. – 58 стр.
5. Ашурзода, Б.С. Тавсияҳои оиди беҳгардонии тавсифоти акустикии биноҳои ҷамъиятӣ / Б.С. Ашурзода, Н.Н. Хасанов, Р.Х. Пирматов, З.А. Чумаева // Паёми политехникӣ. Бахши: Таҳқиқоти муҳандисӣ. – 2025. – № 4(72). – С. 216–220.
6. Гусев, Н.М. Основы строительной физики / Н.М. Гусев. – М.: Стройиздат, 1975. – 278 с.

7. Ковригин С.Д., Архитектурно-строительная акустика / С.Д. Ковригин, С.И. Крышов. – М.: Высшая школа, 1986. – 256 с.
8. Архитектурная физика / под ред. Н.Ф. Оболенского. – М.: Стройиздат, 2005. – 443 с.

References

1. SP 415.1325800.2018. Zdaniya obshchestvennyye. Pravila akusticheskogo proyektirovaniya [Safety Rules 415.1325800.2018. Public buildings. Rules for acoustic design]. Moscow, 2018. Approved by Order of the Ministry of Construction, Housing and Utilities of the Russian Federation No. 728/pr dated November 15, 2018; entered into force on May 16, 2019. 33 p.
2. Mezhsudarstvennyye stroitel'nyye normy MSN 2.04-03-2003 (SNIp 23-03-2003) «Zashchita ot shuma» [Interstate Building Codes MSN 2.04-03-2003 (SNIp 23-03-2003) "Protection against noise"]. NIISF RAASN. Moscow: FGUP TsPP. P. 34.
3. Rukovodstvo po akusticheskomu proyektirovaniyu zalov mnogotsелеvogo naznacheniya sredney vmestimosti [Guidelines for the acoustic design of medium-capacity multipurpose halls]. NIISF Gosstroya SSSR. 2nd edition, revised and enlarged. Moscow, 1981. P. 47.
4. Stroitel'nyye normy i pravila Respubliki Tadjikistan SNIp RT 31–02–2022 «Obshchestvennyye zdaniya i sooruzheniya» [Building Codes and Regulations of the Republic of Tajikistan SNIp RT 31-02-2022 "Public buildings and structures"]. Committee for Architecture and Construction under the Government of the Republic of Tajikistan. Dushanbe: GUP "NIISA" / Publishing Center, 2023. 58 p.
5. Ashurzoda, B.S. Recommendations for Improving the Acoustic Characteristics of Public Buildings / B.S. Ashurzoda, N.N. Khasanov, R.Kh. Pirmatov, Z.A. Jumayeva // Polytechnic Bulletin. Series: Engineering Research. – 2025. – № 4(72). – P. 216–220.
6. Gusev, N.M. (1975). Osnovy stroitel'noy fiziki [Fundamentals of building physics]. Moscow: Stroyizdat. 278 p.
7. Kovrigin, S.D., & Kryshov, S.I. (1986). Arkhitekturo-stroitel'naya akustika [Architectural and building acoustics]. Moscow: Vysshaya Shkola. 256 p.
8. Obolensky, N.F. (Ed.). (2005). Arkhitekturnaya fizika [Architectural physics]. Moscow: Stroyizdat. 443 p.

МАЪЛУМОТ ДАР БОРАИ МУАЛЛИФ - СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРЕ - INFORMATION ABOUT AUTHOR

TJ	RU	EN
Фазилов Анвар Рахматджанович	Фазилов Анвар Рахматджанович	Fazilov Anvar Rakhmatjanovich
н.и.т., дотсенти кафедраи меъмории биноҳо ва иншоот	к.т.н, доцент кафедры «Архитектура зданий и сооружений»	Candidate of Technical Sciences, Associate Professor of the Department of Architecture of Buildings and Structures
Донишгоҳи техникии Тоҷикистон ба номи академик М.С. Осимӣ	Таджикский технический университет имени академика М.С. Осими	Tajik technical university named after academician M.S. Osimi
E-mail: niisa-fozilov@mail.ru ORCID Id 0000-0002-3683-5494		

ВОПРОСЫ ТРАНСФОРМАЦИИ АРХИТЕКТУРНОЙ СРЕДЫ ГОРОДОВ ТАДЖИКИСТАНА

Ш.И. Рахматуллозода, М.Р. Гиёси, И.И. Гиёсов

Таджикский технический университет имени академика М.С. Осими, г. Душанбе, Республика Таджикистан

В работе исследованы подходы к реконструкции общественных и жилых зданий в городах Таджикистана с акцентом на интеграцию национальных архитектурных элементов в современную городскую среду. Проанализирована практика реконструкции в Душанбе, Худжанде, Кулябе, Гиссаре и Хоробе: выявлено, что в разных регионах страны активно возрождаются традиционные мотивы - от резного декора и айванов до купольных форм и башенных композиций - с учётом локальных особенностей зодчества. Изучены принципы включения национальных элементов в проекты обновления городской застройки: установлена значимость функциональной адаптации традиционных форм (например, использование айванов и навесов для защиты от солнца), применения местных материалов (дерево, керамика, природный камень) и учёта климатических условий. Определены типологические приёмы интеграции для разных категорий объектов: для административных зданий - порталы и аркады, для жилых домов - лоджии и декоративные решётки, для учреждений культуры - орнаменты и внутренние дворы, для ансамблей - ритмическая организация фасадов и сбалансированное озеленение. Выявлено, что реконструкция в Таджикистане выходит за рамки технического обновления: она служит инструментом восстановления культурной идентичности и преемственности между историческим наследием и современными проектными решениями. Сформирована типология подходов к реконструкции - от частичного вмешательства (обновление фасадов) до полной замены объектов при сохранении композиционной логики участка; такая систематизация помогает выбирать оптимальную степень вмешательства с учётом градостроительных ограничений.

Ключевые слова: архитектурная традиция, городская среда, реконструкция, идентичность, культурное наследие.

МАСЪАЛАҶОИ ТАБДИЛӢБИ МУҶИТИ МЕЪМОРИИ ШАҲРӢОИ ТОҶИКИСТОН

Ш.И. Рахматуллозода, М.Р. Гиёсӣ, И.И. Гиёсов

Донишгоҳи техникии Тоҷикистон ба номи академик М.С. Осимӣ, ш. Душанбе, Ҷумҳурии Тоҷикистон

Дар мақола равишҳои бозсозии (реконструксияи) биноҳои ҷамъиятӣ ва истиқоматӣ дар шаҳрҳои Тоҷикистон бо таваҷҷуҳ ба ҳамгироии унсурҳои меъморӣ миллиӣ дар муҳити муносири шаҳрӣ таҳқиқ шудаанд. Таҷрибаи бозсозӣ дар шаҳрҳои Душанбе, Хучанд, Кӯлоб, Ҳисор ва Хоруғ мавриди таҳлил қарор гирифта, муайян карда шуд, ки дар минтақаҳои мухталифи кишвар нақшу ниғор ва унсурҳои суннатӣ – аз ороишоти қандакорӣ ва айвонҳо то шаклҳои ғумбазӣ ва композитсияҳои бурҷӣ – бо назардошти хусусиятҳои маҳаллии меъморӣ ғайбӣ эҳё мешавад. Принсипҳои ворид намудани унсурҳои миллиӣ ба лоиҳаҳои навозии биноҳои шаҳрӣ омӯхта шуда, аҳамияти мутабоқсозии функционалии шаклҳои суннатӣ (масалан, истифодаи айвонҳо ва соябонҳо барои муҳофизат аз офтоб), истифодаи маводи маҳаллӣ (ҷӯб, сафол, санги табиӣ) ва ба назар гирифтани шароити иқлимӣ муқаррар карда шудааст. Усулҳои типологӣ ҳамгироӣ барои категорияҳои гуногуни объектҳо муайян карда шудаанд: барои биноҳои маъмурӣ – пештоқҳо ва аркадаҳо, барои биноҳои истиқоматӣ – лочкияҳо ва панҷараҳои ороишӣ, барои муассисаҳои фарҳангӣ – орнаментҳо (нақшу ниғор) ва ҳавлиҳои дохилӣ, барои ансамблҳо – ташкили ритмикии фасадҳо ва кабудизоркунии мутаваззин. Маълум гардид, ки бозсозӣ дар Тоҷикистон аз доираи навозии техникӣ берун баромада, ҳамчун воситаи барқарорсозии ҳувиати фарҳангӣ ва ворисияти байни мероси таърихӣ ва қарорҳои лоиҳакашии муосир хизмат мекунад. Типологияи равишҳо ба бозсозӣ – аз даҳлати ҷузъӣ (навозии фасадҳо) то иваз намудани пурраи объектҳо бо ниғоҳ доштани мантиқи композитсионии китъаи замин шакл дода шудааст; ин низомбандӣ барои интиҳоби дараҷаи оптималии даҳлат бо назардошти маҳдудиятҳои шаҳрсозӣ кӯмак мерасонад.

Калидвожаҳо: анъанаи меъморӣ, муҳити шаҳрӣ, бозсозӣ, ҳувиат, мероси фарҳангӣ.

TRANSFORMATION OF THE ARCHITECTURAL ENVIRONMENT OF TAJIK CITIES

Sh.I. Rakhmatullozoda, M.R. Giyosi, I.I. Giyosov

Tajik Technical University named after Academician M.S. Osimi, Dushanbe, Republic of Tajikistan

The paper investigates approaches to the reconstruction of public and residential buildings in the cities of Tajikistan, with a focus on integrating national architectural elements into the modern urban environment. Analyzing the reconstruction practices in Dushanbe, Khujand, Kulyab, Hisor, and Khorog, the study reveals that traditional motifs—ranging from carved decor and ayvans (open-fronted verandas) to domed structures and tower compositions—are being actively revived across various regions, while accounting for the local specifics of architecture. The principles of incorporating national elements into urban redevelopment projects are examined, establishing the significance of the functional adaptation of traditional forms (e.g., utilizing ayvans and awnings for solar protection), the application of local materials (wood, ceramics, natural stone), and the consideration of climatic conditions. Typological integration techniques are defined for different categories of facilities: portals and arcades for administrative buildings; loggias and decorative lattices (panjara) for residential buildings; ornaments and courtyards for cultural

institutions; and rhythmic facade organization with balanced landscaping for ensembles. The findings indicate that reconstruction in Tajikistan extends beyond mere technical modernization, serving as a tool for restoring cultural identity and ensuring continuity between historical heritage and modern design solutions. Finally, a typology of reconstruction approaches is formulated, ranging from partial intervention (facade renovation) to complete building replacement while preserving the site's compositional logic; this systematization aids in selecting the optimal level of intervention considering urban planning constraints.

Keywords: *architectural tradition, urban environment, reconstruction, identity, cultural heritage.*

Введение

Современные технологии и изменяющиеся требования к качеству жизни диктуют необходимость пересмотра подходов к градостроительству и архитектуре, что влечёт за собой переосмысление роли традиционных форм в современном проектировании. Городская застройка Таджикистана, обладая многослойной структурой и опираясь на историческую идентичность, выступает носителем культурного кода, формирующего образ и качество современной городской среды. Трансформация архитектурной среды – это метод адаптации пространств через изменения форм и планировочных решений для повышения функциональности.

Одним из ключевых вызовов для динамично развивающихся городов являются сохранение и адаптация традиционных форм и образов в современных условиях городского пространства. Часто наблюдается бессистемное изменение облика зданий от поверхностных фасадных обновлений до полной замены объектов. В статье рассмотрен анализ состояния зданий городов Таджикистана – Душанбе, Худжанда, Куляба, Гиссара, Хорога, где проявляется устойчивая тенденция к возрождению национальных архитектурных мотивов при обновлении городской среды. Это подчёркивает необходимость методического подхода, учитывая региональные особенности архитектурного наследия.

Реконструкция общественных и жилых зданий в Таджикистане в последние десятилетия стала не просто способом технического обновления, но и средством сохранения и выражения архитектурной идентичности. Многие объекты советского периода, несмотря на прочность конструкций, утратили актуальность в функциональном и эстетическом смысле. Их адаптация к новым условиям требует не только модернизации инженерных систем, но и смыслового переосмысления архитектурного облика с учётом национального культурного кода. С периода независимости постсоветских стран, каждый самостоятельный регион хочет быть независимым не только в плане суверенитета и политики, но и архитектурно приобрести свои почерк и индивидуальность.

Принципы интеграции национальных элементов

Анализ практики реконструкции общественных зданий в городе Душанбе показывает, что интеграция национальных архитектурных элементов является одним из эффективных инструментов формирования идентичности городской среды. Под национальными элементами понимаются архитектурные формы, декоративные приёмы и пространственные решения, укоренённые в традиционной архитектуре Таджикистана. Их применение в современных условиях позволяет сохранить и одновременно адаптировать архитектуру к актуальным функциональным требованиям.

Практика реконструкции демонстрирует, что интеграция традиционных элементов осуществляется на основе нескольких основных принципов:

Взаимосвязь - ассоативность: применение классических форм (айван, арка, портал), преобразованных в современную архитектурную лексику.

Функциональная адаптация: традиционные формы используются не только для украшения, но и с практической целью — например, как тень от солнца, защита от осадков.

Местные материалы: применение дерева, резьбы, клинкерного кирпича создаёт ощущение преемственности.

Дополнительным аспектом является учёт климатических условий, глубокие окна, теневые ниши и навесы обеспечивают комфорт в жаркую погоду.

Показательным примером подобного подхода является реконструкция площади Садриддина Айни, как наиболее детальный пример представляет поэтапное изменение площади реконструкции с национальными мотивами в современных условиях города Душанбе:

- Площадь С.Айни, в комплекс которого входит торговый комплекс «Садбарг»: характерный памятник, посвящённый 100-летию С.Айни, должен был навсегда сохранить его наследие. Уникальный комплекс стал культурным достоянием города, символ площади со своей идентичностью. С западной стороны от сквера расположена гостиница Душанбе, с севера находится Государственный институт дизайна, к востоку здание торгового центра «Садбарг».

- Государственный институт дизайна и архитектуры: при обновлении здания использованы национальные орнаменты на входной группе и элементы озеленения, типичные для традиционного таджикского двора.

- Гостиница «Душанбе» (арх. Айзикович): реконструкция подчёркивает вертикальные линии фасада и дополняет их арками, характерными для таджикской архитектуры.

Эти примеры показывают, как можно сделать здания более выразительными и близкими жителям без полного разрушения старой структуры. А если брать в масштабе, необходимо сформировать общую модель, интегрируя в градостроительную систему расселения.

1. Влияние на городскую среду – линейные ансамбли, рекреационные коридоры, исторические центры.

2. Общественные пространства - адаптация традиционных архитектурных кодов.

3. Жильё нового типа – функционально гибкие планировки квартир, адаптированные к современным условиям города.

Таким образом, использование национальных архитектурных элементов в реконструкции и принципах интеграции положительно влияет на облик города и формирует идентичность городской среды. Архитектурные объекты становятся знаковыми носителями исторических и культурных ценностей, обеспечивая преемственность между традицией и современностью. Одновременно повышаются качественные характеристики городской среды за счёт использования традиционных материалов, сбалансированных декоративных решений. Важным результатом является рост туристической привлекательности города, поскольку архитектурные объекты с национальными особенностями становятся элементами идентификации и точками концентрации общественного интереса.

Методология - подобный подход наиболее оправдан при реконструкции административных зданий советского периода, жилых комплексов в центральных зонах города, бывших культурных и образовательных учреждений, а также архитектурных ансамблей, формирующих пространства площадей и парков.

Таблица 1 – Тип здания формирует группу, где показаны универсальные приёмы на практике:

Table 1 – Building types forming groups that demonstrate universal integration techniques in practice:

Тип здания	Возможные элементы интеграции	Цель применения
Административные	Портальные входы, аркады, резные навесы	Престижность, узнаваемость
Жилые дома	Айваны, лоджии, решётки, лепнина	Уют, защита от солнца, связь с традицией
Учреждения культуры	Орнамент, цвета, внутренние дворики	Атмосфера культурной преемственности
Ансамбли	Ритм фасадов, сочетание материалов, озеленение	Единство среды, гармония восприятия

Анализ современных процессов реконструкции в архитектурной практике Таджикистана показывает, что интеграция национальных архитектурных элементов выступает важным механизмом формирования устойчивой и культурно-ориентированной городской среды. Данный подход позволяет не только обновлять современное состояние здания, но и восстанавливать утраченные культурные смыслы, формируя визуальную и историческую идентичность городской застройки [1, 2].

Основное городское строительство в рассматриваемый период осуществлялось не в исторической части города, а на его правобережной территории. Подобная градостроительная стратегия была обусловлена рядом факторов: ограниченными возможностями пространственного развития исторической застройки, необходимостью модернизации городской инфраструктуры, а также стремлением сформировать новые жилые и общественные районы, соответствующие принципам современного градостроительства. В результате происходило формирование новой планировочной структуры города, где характер представлен регулярной сеткой улиц, увеличением масштабов общественных пространств. Таким образом, реконструкция в условиях современных таджикских городов требует комплексного и гибкого подхода, сочетающего сохранение традиций с внедрением современных проектных решений (рис.1). Грамотное использование архитектурных приёмов и учёт всех факторов позволяют формировать качественную и идентичную городскую среду, отвечающую потребностям общества и требованиям времени.

В результате исследования основное городское строительство велось не в исторической части города, а на его новой, правобережной стороне, что способствовало новой градостроительной модели, реализовывая современные архитектурные и функциональные решения.



Рисунок 1 - Типология подходов к реконструкции жилых и общественных зданий в городской среде Таджикистана (авторская разработка) подходов: от частичной реконструкции до полного сноса с учётом проектных и градостроительных ограничений.

Figure 1 - Typology of approaches to the reconstruction of residential and public buildings in the urban environment of Tajikistan (author's development), ranging from partial reconstruction to complete demolition while considering design and urban planning constraints.

Город Душанбе предлагает широкий спектр примеров реконструкции с национальным акцентом. Один из ключевых архитектурных ансамблей столицы — площадь С.Айни — демонстрирует разнородные подходы к реконструкции.

Подобная практика наблюдается и при реконструкции Дома политпросвещения (архитектор Э. Ерзовский) после реконструкции - Кохи Вахдат (рис.2), здания Академии наук, филармонии им. А.Джураева (рис.3) и др. Здесь реконструкция не ограничивается техническим обновлением, но сопровождается возвращением национального облика зданий через использование традиционных форм, орнамента [6, 7].



Рисунок 2 - Здание Дома политпросвещения, Кохи Вахдат после реконструкции
Figure 2 - The Building of the House of Political Enlightenment, Kokhi Vahdat after reconstruction



Рисунок 3 - Здание филармонии им. А.Джураева до и после реконструкции
Figure 3 - The Building of the A. Juraev State Philharmonic before and after reconstruction

В жилой архитектуре микрорайонов реконструкция зачастую принимает форму обновления фасадов с параллельным оформлением в национальном стиле — резные элементы, эркеры, использование декоративных решёток в оконных зонах. Эти меры не только улучшают теплоизоляцию зданий, но и возвращают им выразительность и связь с культурным контекстом [2,3].

Подобные процессы наблюдаются и в других городах страны. Например, в Худжанде при реставрации опирающихся на исторически сложившихся архитектурно-композиционных принципах традиционного зодчества. Так, в городах и регионах центральных кварталов применяется отделка фасадов резным деревом и цветной керамикой, а также адаптация айванов в общественных пространствах (в том числе в проектах по благоустройству набережной Сырдарьи). В Кулябе реконструкция зданий, прилегающих к мемориальному комплексу Мир Саид Али Хамадони, также осуществляется с учётом традиционных архитектурных мотивов, таких как аркады, тимпаны и купольные формы. В Гиссаре, особенно вблизи Гиссарского историко-архитектурного заповедника, применяются решения, поддерживающие локальный колорит: восстановление резных порталов, использование глинобитных фактур в отделке новых зданий и элементы башенной композиции. В Хороге архитекторы при реконструкции общественных объектов активно используют местные материалы — шлакоблок, дерево, природный камень, — а также светопрозрачные навесы и айваны, типичные для памирского зодчества.

Это подчёркивает необходимость методического подхода, учитывающего региональные особенности сохранения культурной идентичности, адаптируя исторический опыт к современным требованиям архитектуры и градостроительства.

Как показали современные практики, реконструкции общественных и жилых зданий в Таджикистане напрямую перекликаются с историческими архитектурно-композиционными приёмами. Так, ещё в традиционном зодчестве городов (Душанбе, Худжанда, Куляба, Гиссара и др.) использовались чёткая иерархия объёмов, доминирующие архитектурные акценты (порталы, айваны, купола), ритмическая организация фасадов, периметральная или линейная застройка с формированием полузакрытых дворов. Данные приёмы обеспечивали не только функциональную организацию городской среды, но и формировали гармоничный визуально-пространственный ритм улиц и площадей [7].

Сегодня в рамках реконструкции зданий и городских фрагментов эти принципы находят новое прочтение: контраст вертикалей и горизонталей, симметрия и осевая композиция, объёмно-пространственная тектоника снова становятся актуальными, но уже с применением современных конструктивных решений и материалов [8]. Например, размещение доминант (высотных жилых домов, как на площади С.Айни), сохранение исторических «красных линий» застройки, организация айванов и аркад вдоль фасадов — всё это восходит к историческим градостроительным традициям, адаптированным к современным нормам и технологиям.

Тем самым, прослеживается преемственность между историко-архитектурной тканью городов и современными решениями, основанными на принципах уважения к национальной культуре (Рис.4).

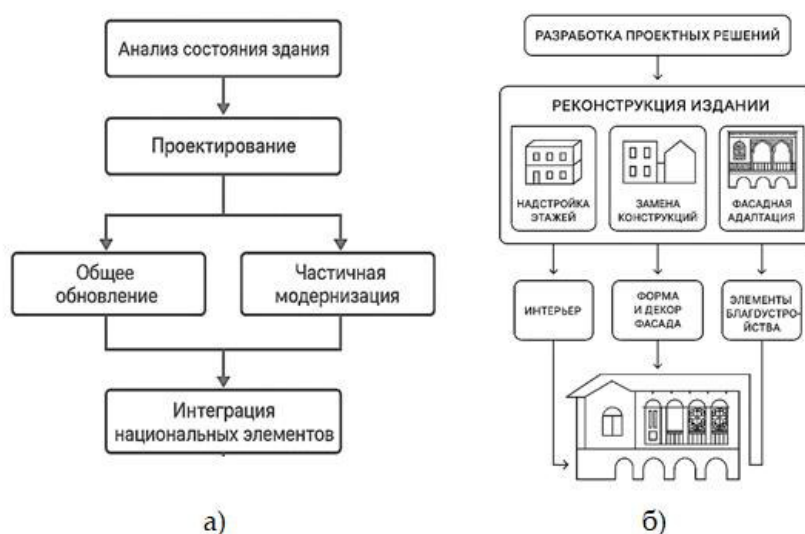


Рисунок 4 - а) Этапы реконструкции зданий с интеграцией национальных элементов, разработка проектных решений; б) разработка проектных решений

Figure 4 - a) Stages of building reconstruction with the integration of national elements, development of design solutions; b) development of design solutions

Это не механическое копирование форм, а осмысленное включение архетипов – элементов с глубоким смысловым и символическим значением – в процесс обновления городской среды. Такой подход создаёт устойчивую архитектурную идентичность, делает реконструкцию не только техническим, но и культурным актом.

В этом контексте важным этапом становится разработка типологии реконструкции, представленной на рисунке 1, где структурированы формы вмешательства — от фасадных интервенций до полной замены зданий с сохранением композиционной логики участка. Предложенная схема позволяет визуализировать различия подходов и зафиксировать уровень применения национальных элементов в каждом из них.

Вывод

В процессе проведения анализа реконструкции общественных и жилых зданий в городской среде Таджикистана, результаты нельзя рассматривать лишь как техническое обновление или продление срока их эксплуатации. Он носит комплексный характер и затрагивает архитектурно-композиционные, культурные и градостроительные аспекты. В условиях Душанбе и других городов Таджикистана особое значение приобретает включение национальных архитектурных элементов, что позволяет одновременно отвечать современным требованиям и укреплять визуальную и культурную идентичность города. В этом контексте реконструкция выступает не просто инженерным действием, а важным инструментом сохранения архитектурной идентичности и его органичного развития в условиях модернизации.

Таким образом, успешная реконструкция городов Таджикистана реализует стратегию культурного диалога между прошлым и будущим, обеспечивая устойчивое развитие городской среды и гармоничное сочетание традиций и инноваций.

Рецензент: *Джурахонзода С.Ш.* - канд. архитектуры, Ректор Государственного института изобразительного искусства и дизайна Таджикистана

Литература

1. Акбаров, А.А. Архитектурные элементы традиционного зодчества Таджикистана в практике модернизации городской среды / А.А. Акбаров // Современные технологии и проектирование. – 2021. – № 5. – С. 41–48.
2. Акбаров, А.А. Особенности планировки и застройки сельского посёлка в условиях Таджикистана / А.А. Акбаров. – 3-е дополненное изд. – Душанбе: «Балогат», 2021. – 150 с.
3. Каганова, И.О. Реконструкция жилой застройки в культурно-исторических центрах городов: опыт и проблемы / И.О. Каганова // Гуманитарные научные исследования. – 2014. – № 12. – С. 103–106.
4. Колбовский, Е.Ю. Стратегическое пространственное планирование как инструмент регионального развития / Е.Ю. Колбовский // Ярославский педагогический вестник. – 2011. – № 3. – Т. III (Естественные науки).

5. Рахматуллозода, Ш.И. Факторы развития городской среды с учетом транспортной инфраструктуры города Душанбе / Ш.И. Рахматуллозода, К.Ф. Усмонзода // Политехнический вестник. – 2019. – № 3(47). – С. 131.
6. Солодянкина, С. Ландшафтно-экологическое планирование для оптимизации природопользования: учебное пособие / С. Солодянкина, М.В. Левашёва. – Иркутск: ИГУ, 2013. – 170 с.
7. Хасанов, Н.Н. Современные методы реконструкции жилых зданий в контексте национальных традиций / Н.Н. Хасанов, И.И. Нигматов // Архитектура Востока. – 2020. – № 3. – С. 75–81.

References

1. Akbarov, A.A. Architectural Elements of Traditional Tajik Architecture in the Practice of Urban Environment Modernization / A.A. Akbarov // Modern Technologies and Design. – 2021. – № 5. – P. 41–48.
2. Akbarov, A.A. Features of Planning and Development of Rural Settlements in the Conditions of Tajikistan / A.A. Akbarov. – 3rd revised and expanded ed. – Dushanbe: “Balogat”, 2021. – 150 p.
3. Kaganova, I.O. Reconstruction of Residential Development in Cultural and Historical Centers of Cities: Experience and Problems / I.O. Kaganova // Humanitarian Scientific Research. – 2014. – № 12. – P. 103–106.
4. Kolbovsky, E.Yu. Strategic Spatial Planning as a Tool for Regional Development / E.Yu. Kolbovsky // Yaroslavl Pedagogical Bulletin. – 2011. – № 3. – Vol. III (Natural Sciences).
5. Rakhmatullozoda, Sh.I. Factors of Urban Environment Development Considering the Transport Infrastructure of Dushanbe City / Sh.I. Rakhmatullozoda, K.F. Usmonzoda // Polytechnic Bulletin. – 2019. – № 3(47). – P. 131.
6. Solodyankina, S. Landscape-Ecological Planning for Optimization of Nature Management: Textbook / S. Solodyankina, M.V. Levashova. – Irkutsk: Irkutsk State University (ISU), 2013. – 170 p.
7. Khasanov, N.N. Modern Methods of Residential Building Reconstruction in the Context of National Traditions / N.N. Khasanov, I.I. Nigmatov // Architecture of the East. – 2020. – № 3. – P. 75–81.

МАЪЛУМОТ ДАР БОРАИ МУАЛЛИФОН-СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ-INFORMATION ABOUT AUTHORS

RU	TJ	EN
Рахматуллозода Шахноз Ибодулло	Раҳматуллозода Шаҳноз Ибодулло	Rahmatullozoda Shahnoz Ibodullo
кандид. арх., и.о. доцента	Номзади меъморӣ..и.в. дотсент	Candidate of architecture, associate professor
Таджикский технический университет им. акад. М.С. Осими	Донишгоҳи техникии Тоҷикистон ба номи М.С. Осимӣ	Tajik Technical University named after acad. M.S. Osimi
E-mail: Sh.rahm75@gmail.com		
RU	TJ	EN
Гиёси Мехрубон Рахматулло	Ғиёси Мехрубон Раҳматулло	Giyosi Mehrubon Rahmatullo
Докторант PhD	Докторанти PhD	PhD Doctorant
Таджикский технический университет им. акад. М.С.Осими	Донишгоҳи техникии Тоҷикистон ба номи М. С. Осимӣ	Tajik Technical University named after acad. M.S. Osimi
E-mail: IGiesov@mail.ru		
RU	TJ	EN
Гиёсов Изатулло Исматуллоевич	Ғиёсов Изатулло Исматуллоевич	Giesov Izatullo Ismatullovich
Таджикский технический университет им. акад. М.С. Осими	Донишгоҳи техникии Тоҷикистон ба номи М.С. Осимӣ	Tajik Technical University named after acad. M.S. Osimi

ВЛИЯНИЕ ВЫСОКООСНОВНЫХ И КИСЛЫХ ЗОЛ–УНОСА НА КОМПОЗИЦИОННОМ ВЯЖУЩЕМ И АСПЕКТ СВОБОДНОГО ОКСИДА КАЛЬЦИЯ

И.С. Муминов, А.А. Акрамов, Г.А. Абдурахманова

Таджикский технический университет имени академика М.С. Осими, г. Душанбе, Республика Таджикистан

Композиция на основе высоко- и низкокальцевой золы-уноса, активированная карбонатом натрия, представляет собой эффективную систему бесклинкерного гидравлического вяжущего. В процессе затворения водой создается щелочная среда, инициирующая пуццолановые и гидравлические реакции зольных компонентов. Это приводит к формированию стабильной структуры водостойкого камня, предел прочности которого варьируется в диапазоне 10-20 МПа и выше. Гидротермальная обработка существенно интенсифицирует процесс набора прочности. При этом критически важным остается контроль объемных деформаций, вызванных гидратацией свободного СаО. Масштаб этих деформаций определяется совокупностью факторов: химическим составом золы, её удельной поверхностью и выбранным температурным графиком. Грамотный учет данных параметров позволяет удерживать расширение в рамках нормативных требований. Дополнительным инструментом стабилизации является введение ультрадисперсного кремнезема, который эффективно купирует деструктивные явления даже при использовании грубодисперсных фракций золы с избыточным содержанием свободной извести.

Ключевые слова: зола-уноса, композиционные вяжущие, микрокремнезем, утилизация, оксид кальция, кислая зола, высококальцевая зола, геополмерный бетон.

ТАЪСИРИ ҲОКИСТАРҲОИ АНГИШТСАНГИ БАЛАНДАСОС ВА ТУРШ БА МАВОДҲОИ ПАЙВАСТКУНАНДАИ КОМПОЗИТСИОНӢ ВА ҶАНБАИ ОКСИДИ КАЛСИЙ ДАР ҲОЛАТИ ОЗОД

И.С. Муминов, А.А. Акрамов, Г.А. Абдурахманова

Донишгоҳи техники Тоҷикистон ба номи академик М.С. Осимӣ, ш. Душанбе, Ҷумҳурии Тоҷикистон

Композитсия дар заминаи ҳокистари ангиштсангӣ баландкалсиум ва пасткалсиум, ки бо карбонати натрий ғайӣ карда шудааст, низоми самарабахши маводи пайвасткунандаи гидравликии беклинкериро ифода мекунад. Ҳангоми омехтакунии бо об муҳити ишқорӣ ба вуҷуд меояд, ки реаксияҳои пуцсоланӣ ва гидравликии чузъҳои ҳокистарро оғоз мебахшад. Ин раванд боиси ташаккули сохтори устувори сангӣ обтобовар мегардад, ки ҳудуди мустаҳкамӣ он дар доираи 10-20 МПа ва аз он боло тағйир меёбад. Коркарди гидротермалӣ суръати мустаҳкамшавии маводро ба таври назаррас меафзояд. Дар ин росто, назорати деформатсияҳои ҳаҷмӣ, ки дар натиҷаи гидрататсияи СаО-и озод ба амал меоянд, аҳамияти калидӣ дорад. Микёси ин деформатсияҳо аз маҷмӯи омилҳо: таркиби кимиёвии ҳокистар, сатҳи ҳоси он ва речаи интиҳобшудаи ҳарорат вобаста аст. Баҳисобгирии дурусти ин нишондиҳандаҳо имкон медиҳад, ки васеъшавии ҳаҷм дар доираи талаботи меъёрӣ нигоҳ дошта шавад. Ҳамчун воситаи иловагии устуворсозӣ, ворид намудани кремнезёми ультрадисперсӣ истифода мешавад, ки зухуроти харобкунандаро ҳатто ҳангоми истифодаи фраксияҳои дурушти ҳокистар бо миқдори зиёди оҳаки озод самаранок пешгирӣ менамояд.

Калидвожаҳо: ҳокистари ангиштсанг, маводҳои пайвасткунандаи композитсионӣ, микрокремнезем, истифодаи такрорӣ, оксиди калсий, ҳокистари туриш, ҳокистари калсияш баланд, бетони геополмерӣ.

THE IMPACT OF HIGH-CALCIUM AND SILICEOUS FLY ASH ON COMPOSITE BINDERS AND THE ROLE OF FREE CALCIUM OXIDE CONTENT

I.S. Muminov, A.A. Akramov, G.A. Abdurakhmanova

Tajik Technical University named after Academician M.S. Osimi, Dushanbe, Republic of Tajikistan

An effective clinker-free hydraulic binder system is achieved through the sodium carbonate activation of high- and low-calcium fly ash blends. Upon hydration, an alkaline environment is established, triggering the pozzolanic and hydraulic reactivity of the ash constituents. This process results in a stable, water-resistant matrix exhibiting compressive strengths typically ranging from 10-20 MPa or higher. While hydrothermal treatment significantly accelerates strength development, managing volumetric deformations-driven by the hydration of free CaO – remains a critical challenge. The magnitude of such expansion is governed by a synergy of factors, including the chemical profile of the ash, its specific surface area, and the applied curing temperature profile. Precise calibration of these variables ensures that expansion remains within regulatory limits. Furthermore, the incorporation of ultra-fine silica serves as a stabilizing agent, effectively mitigating destructive effects even when utilizing coarse ash fractions with high free lime content.

Keywords: fly ash, composite binders, silica fume, waste recycling, calcium oxide, low-calcium fly ash, high-calcium fly ash, geopolymer concrete.

Введение

Согласно имеющимся данным, объем ежегодной генерации золошлаковых отходов (ЗШО) на тепловых электростанциях Таджикистана на текущий момент превышает 500 тыс. тонн. Общая площадь, занимаемая золоотвалами, достигает 5 тыс. км², что эквивалентно накоплению порядка

1–1,5 млн тонн отходов [1]. Уровень вторичного использования ЗШО в республике остается крайне низким: в строительный сектор и дорожное хозяйство направляется лишь 5–10 % от общего объема [1, 3, 4], несмотря на наличие более позитивных оценок в зарубежной литературе [2]. Учитывая прогнозируемый рост доли угля в энергетическом балансе страны с 26 % до 34–36 % к 2030 году [5], следует ожидать дальнейшей интенсификации процесса накопления золошлаков.

Глобальная практика обращения с золошлаковыми отходами (ЗШО) демонстрирует значительный разброс в показателях их переработки. Крупнейшие генераторы золы, в частности Китай и Индия (производящие ежегодно свыше 100 млн тонн), вовлекают во вторичный оборот около 40–45 % остатков. В западных странах эти цифры существенно выше: в США рециклингу подлежит более 60 % отходов, а во Франции и Германии уровень утилизации перешагнул порог в 80 %. Лидерами в данной сфере остаются Япония, где эффективность достигает 95 %, а также Италия и Скандинавские страны, фактически реализовавшие концепцию безотходного производства (100%) [2]. Основными потребителями техногенного сырья являются строительный и аграрный секторы, природоохранные инициативы, а также наукоемкие производства по экстракции редких металлов и глинозема [1, 6]. Развитию данных технологий за рубежом способствует жесткий фискальный прессинг в виде заградительных тарифов и штрафов за размещение отходов на свалках [1, 3].

В структуре золошлаковых отходов преобладает зола-унос, доля которой достигает 80–85 %. Этот востребованный материал улавливается специальными фильтрами из дымовых выбросов, в то время как меньшая часть состава представлена донным шлаком, оседающим в нижней части установок. Традиционная для отечественной энергетики «мокрая» технология подразумевает слив отходов в виде водонасыщенной смеси в специальные отвалы. Однако для эффективной интеграции золошлаков во вторичный оборот критически важно развивать методы сухого удаления [14]. Современный вектор модернизации ТЭС направлен именно на реализацию таких технических решений.

Значительный потенциал утилизации золы-уноса сосредоточен в производстве закладочных смесей для консервации подземных выработок [7]. Показательным является опыт Великобритании: для ликвидации соляных пустот в Норвиче было использовано около 1,1 млн тонн золы, доставляемой с теплоэлектростанций по железной дороге [8]. Применяемый состав включал 95 % зольного компонента и 5 % цемента, смешанных с рассолом. Стоит подчеркнуть, что британская зола относится к категории кислой (с низким содержанием кальция), в то время как для качественного заполнения шахт более эффективны высококальциевые разновидности [7]. Именно такие, богатые кальцием отходы, преобладают в общей массе золы-уноса на объектах энергетики Таджикистана [1, 15–20].

В современной науке активно рассматриваются перспективы использования золы-уноса, как базового компонента при создании бесцементных (геополимерных) бетонов [9]. Благодаря своим свойствам, высококальциевые модификации золы в таких составах способны выступать в роли автономного гидравлического вяжущего. Однако, ключевым препятствием для их массового внедрения остается избыточное количество свободного оксида кальция (CaO). Процесс его запоздалой гидратации провоцирует масштабные деформации объема, что зачастую ведет к разрушению готового материала. Данный фактор накладывает серьезные ограничения на использование подобного сырья в производстве вяжущих систем [10]. В профильной литературе, в частности в работе [11], представлен подробный анализ методов преодоления этой проблемы. К числу эффективных решений для стабилизации структуры материалов относят предварительное тонкое измельчение золы, а также введение в смесь добавок-модификаторов: микрокремнезема [11, 15–20], молотого стеклобоя [12] или иных продуктов техногенного происхождения.

Согласно результатам исследований [13], комбинирование высококальциевой золы с золой кислого типа способствует значительному улучшению эксплуатационных свойств геополимерного бетона. Наилучшие значения прочности и устойчивости к сульфатной агрессии наблюдаются при эквивалентном соотношении кислых и основных зольных фракций в связующем. Данный эффект обусловлен пуццолановой активностью кислой золы: она вступает в реакцию со свободным CaO , трансформируя его в гидросиликатный гель (C-S-H). Это не только упрочняет структуру цементного

камня, но и минимизирует риск деформаций. Однако, практическое внедрение этого метода требует наличия логистического доступа к обоим видам сырья.

В текущей работе рассматриваются перспективы создания устойчивого искусственного камня на базе бесцементных смесей. В состав таких систем включены высококальциевая зола (как гидравлическое вяжущее), низкокальциевая зола (как пуццолановая добавка) и сода (Na_2CO_3) в качестве активатора процесса твердения.

Материалы и методы исследования

Объектами исследования послужили три типа зольных отходов, полученных при сжигании угля на Душанбинской ТЭЦ-2: две разновидности высококальциевой золы-уноса (обозначенные как ВЗУ-1 и ВЗУ-2) и одна низкокальциевая (НЗУ). Физико-химические параметры данных материалов, включая их удельную поверхность по Блейну, систематизированы в таблице 1.

Таблица 1 – Химический состав используемых зол-уноса
Table 1 – Chemical composition of the fly ash used

Зола	Содержание, % масс										$S_{\text{уд}}$ по Блейну, $\text{см}^2/\text{г}$
	CaO	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	SO ₃	MgO	Na ₂ O	K ₂ O	Прочие компоненты	CaO _{св}	
ВЗУ-1	38,6	17,9	6,8	15,3	6,5	10,4	1,4	0,3	2,8	8,7	4000
ВЗУ-2	62,2	8,4	4,1	5,3	9,4	6,3	0,7	0,2	0,3	21,8	2190
НЗУ	1,8	63,8	26,8	3,9	0,3	0,4	0,5	0,6	1,9	-	5400

Фракцию ВЗУ-2, отличающуюся более крупными частицами, тестировали, как в нативном виде, так и после механической активации в лабораторной вибромельнице.

В качестве активатора твердения применялся карбонат натрия (Na_2CO_3) марки «хч». Линейка активных минеральных модификаторов была представлена микрокремнеземом («МКУ-85»), осажденным кремнеземом («РОСИЛ-175»), а также коллоидным кремнеземом («Лейксил 30-А»).

В качестве сырьевых компонентов для исследования были отобраны отходы Душанбинской ТЭЦ-2: золы-уноса с высоким (ВЗУ-1, ВЗУ-2) и низким (НЗУ) содержанием кальция. В таблице 1 отражены их основные характеристики, включая дисперсность (показатель Блейна). Технологическая схема эксперимента предполагала использование ВЗУ-2 в двух видах: без предварительной обработки и после механической активации (помола) в лабораторной вибромельнице.

Реакционную способность систем повышали путем добавления активатора – Na_2CO_3 («хч»). Для модификации свойств получаемых материалов применялся комплекс кремнийсодержащих добавок, в который вошли микрокремнезем «МКУ-85», кремнезем марки «РОСИЛ-175» и коллоидный продукт «Лейксил 30-А».

Процедура приготовления составов начиналась с сухого перемешивания компонентов (ВЗУ, НЗУ и Na_2CO_3) в требуемых пропорциях. После добавления воды затворения смесь перемешивалась в течение одной минуты до достижения гомогенной консистенции. В рамках эксперимента изменяли тип высококальциевой золы и её концентрацию (от 20 до 100 % от общего веса зольной смеси), а также дозировку карбоната натрия (в интервале 3-7 % от массы сухих зол). Для составов на основе ВЗУ-1 водотвердое отношение (В/Т) поддерживалось на уровне 0,35, тогда как для смесей с ВЗУ-2 этот показатель составлял 0,4. Данные параметры В/Т позволили обеспечить требуемую пластичность и удобоукладываемость теста во всех сериях образцов.

Введение коллоидного кремнезема (1-2 % в эквиваленте SiO_2 от веса зол, что соответствует 3,3-6,6 % раствора) осуществлялось совместно с водой, при этом объем жидкости в добавке строго учитывался в общем расходе воды. Минеральные модификаторы в виде микрокремнезема и осажденного SiO_2 (1-2 % от массы зольной смеси) предварительно смешивались с сухими ингредиентами.

Оценку стабильности объема материала проводили с помощью колец Ле-Шателье в соответствии с регламентом ГОСТ 30744-2001. После завершения процесса схватывания образцы

в кольцах подвергались влажному прогреву при 80 °С. В альтернативных сериях предусматривалось предварительное выдерживание проб в камере влажного хранения (температура 20 °С) в течение 1 или 7 суток.

Для анализа прочностных показателей формовались кубы с ребром 30 мм. Демонтаж форм осуществлялся спустя час после фиксации схватывания. Прочностные испытания на сжатие проводились по нескольким сценариям:

Термическая обработка: хранение при 80 °С в условиях полной влажности сразу после распалубки.

Естественный цикл: выдерживание в температурном режиме 20 °С в течение периода от одних суток до четырех недель.

Гибридный метод: недельная экспозиция при 20 °С, дополненная финальной термической обработкой при 80 °С на протяжении 24 часов.

Для изучения микроструктуры материала после механических тестов применялся метод сканирующей электронной микроскопии (СЭМ). Образцы размером от 5 до 10 мм извлекались из ядра разрушенных бетонных кубов. Предварительная подготовка включала 24-часовую дегидратацию в этиловом спирте и фиксацию массы путем высушивания при 40-45 °С.

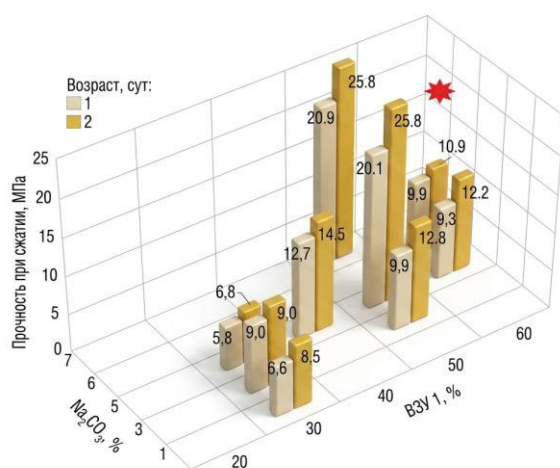


Рисунок 1 – Характер изменения предела прочности при сжатии геополимерного материала под влиянием содержания добавки ВЗУ-1 и концентрации Na_2CO_3 . Результаты зафиксированы через сутки и двое суток твердения (параметры среды: $T=80^\circ\text{C}$, влажность 95 %, водотвердое отношение 0,35)

Figure 1 – Nature of change in the compressive strength of the geopolymer material under the influence of VZU-1 additive content and Na_2CO_3 concentration. Results were recorded after 1 and 2 days of curing (environmental parameters: $T = 80^\circ\text{C}$, humidity 95%, water-to-binder ratio 0.35)

Обсуждение

Графические данные на рисунке 1 иллюстрируют, как компонентный состав влияет на механическую устойчивость композитов, синтезированных с использованием ВЗУ-1 (характеризующейся предельно низким содержанием свободного CaO). Эмпирически установлено, что максимальное сопротивление сжатию (в пределах 20-25 МПа) фиксируется при сбалансированном соотношении зольных фракций с разным уровнем кальция. Вывод о критической важности пуццоланового потенциала низкокальциевой золы подтверждается тем, что при её замене инертными микронаполнителями – такими как кварцевая мука или гранитный отсев – прочность структуры обрушивается до минимальных 3,0-4,5 МПа.

Для инициации эффективной гидратации высококальциевого зольного компонента целесообразно использование карбоната натрия в количестве 5 % от массы сухих веществ. Опытным путем доказано, что дальнейшее увеличение концентрации данного щелочного активатора не приводит к значимому повышению прочности материала, обозначая предел эффективности выбранной дозировки.

Влияние условий твердения и параметра водотвердого фактора на кинетику упрочнения наиболее оптимального состава (отмеченного индикатором * на рис. 1) представлено на рисунке 2. Выявлено, что применение гидротермального воздействия существенно ускоряет динамику набора

механической прочности. При этом важно отметить, что даже в условиях стандартного температурного режима (20 °С) композиты сохраняют устойчивую тенденцию к повышению прочностных характеристик. Влияние фактора В/Т осталось традиционным: снижение содержания воды в системе закономерно привело к повышению прочности камня.

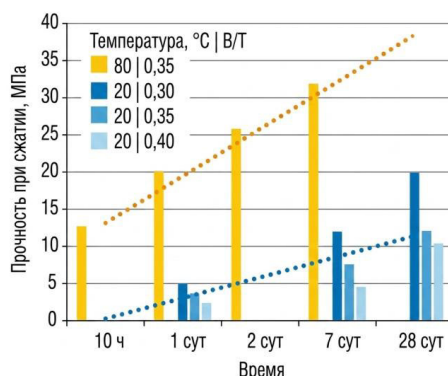


Рисунок 2 – Зависимость сопротивления сжатию от водотвердого отношения и температурного режима влажного хранения образцов

Figure 2 – Dependence of compressive strength on the water-to-binder ratio and the temperature regime of wet storage of specimens

Составы на основе золы ВЗУ-2, в которой концентрация свободного СаО в 2,5 раза превышает аналогичный показатель для ВЗУ-1, подготавливались при В/Т = 0,4. Данный уровень водопотребности был выбран для поддержания необходимой пластичности смеси во всем интервале варьирования содержания щелочного активатора и зольного компонента.

По завершении суточного цикла гидротермальной обработки (80 °С) затвердевший материал демонстрировал невысокие прочностные показатели (рис. 3). Механическая активация золы путем её измельчения до удельной поверхности порядка 4300 см²/г способствовала росту предельной прочности до 10 МПа. Тем не менее, достигнутый результат оказался вдвое ниже максимальных значений, зафиксированных для образцов на базе ВЗУ-1.

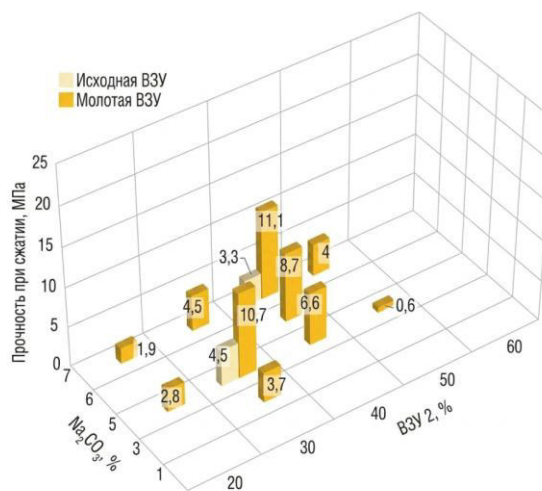


Рисунок 3 – Сопротивление сжатию композитов на основе ВЗУ-2 (в нативном и активированном состоянии) в зависимости от концентрации золы и щелочного компонента (режим твердения: 24 ч, 80 °С, влажность 95 %, В/Т = 0,40)

Figure 3 – Compressive strength of VZU-2-based composites (in native and activated states) as a function of ash and alkaline component concentrations (curing regime: 24 h, 80 °C, humidity 95%, water-to-binder ratio = 0.40)

Пиковые значения прочности для систем с ВЗУ-2 фиксировались при её дозировке в интервале 30–50 % от массы смеси. Дальнейшее наращивание доли высококальциевой составляющей в структуре вяжущего провоцировало деструкцию материала и выраженное увеличение его геометрических размеров. Данный негативный эффект сохранялся даже при существенном повышении удельной поверхности золы за счет механического помола.

Присутствие свободного СаО в составе ВЗУ диктует необходимость строгого мониторинга объемных деформаций искусственного камня, поскольку этот фактор напрямую определяет долговечность и прочностные показатели материала. Данные по оценке стабильности объема (испытания в кольцах Ле-Шателье) для смесей на основе исследуемых зол и карбоната натрия приведены на рис. 4, а подробные рецепты — в табл. 2.

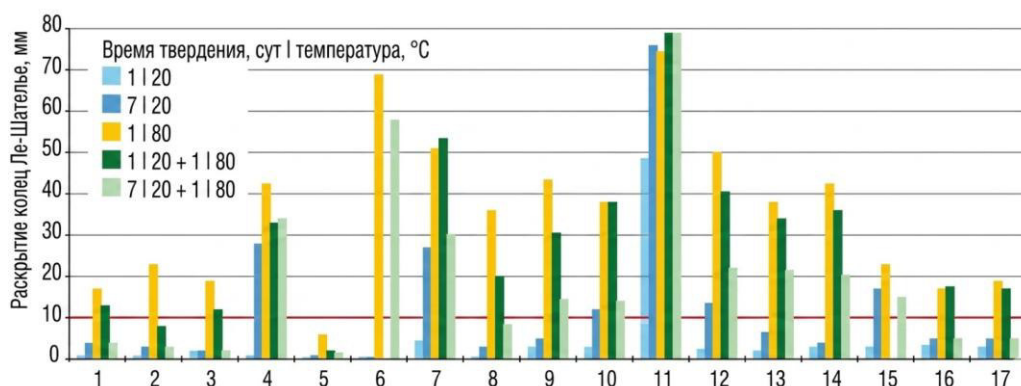


Рисунок 4 – Данные по оценке стабильности объема образцов (величина раскрытия колец Ле-Шателье). Нумерация смесей на данном графике, а также на рис. 5 и 7, идентична обозначениям, принятым в табл. 2.

Figure 4 – Data on the assessment of specimen volume stability (Le Chatelier ring expansion value). The numbering of the mixtures on this graph, as well as in Figs. 5 and 7, is identical to the designations adopted in Table 2.

Таблица 2 – Рецептурный состав смесей, использованных при определении равномерности изменения объема

Table 2 – Formulation of the mixtures used in determining the soundness of volume

Номер состава	Содержание компонентов теста (без учета воды затворения), % масс.				В/Т
	Основа		Добавки (сверх 100%)		
	ВЗУ	НЗУ	Na ₂ CO ₃	SiO ₂ *	
ВЗУ-1, CaO _{св} 8,7% S _{уд} =4000 см ² /г					
1	50	50	5	-	35
2	40	60	5	-	35
3	40	60	5	-	40
4	50	50 (кварцевая мука)	5	-	35
5	50	50	5	1 (К)	35
6	100	—	5	2 (К)	35
ВЗУ-2, CaO _{св} 21,8% S _{уд} =2190 см ² /г					
7	30	70	5	-	40
8	30	70	5	1 (К)	40
9	30	70	5	1 (О)	40
10	30	70	5	1 (М)	40
11	40	60	7	-	40
12	40	60	7	1 (К)	40
13	40	60	7	2 (К)	40
14	40	60	7	2 (О)	40
ВЗУ-2, CaO _{св} 21,8% S _{уд} =4280 см ² /г					
15	30	70	5	-	40
16	30	70	5	1 (К)	40
17	30	70	5	1 (О)	40

* К – коллоидный, О – осажденный, М – микрокремнезем.

Композиты, включающие 40-50 % ВЗУ-1 и низкокальцевую золу, при нормальных температурных условиях демонстрировали малые деформации расширения, составившие к 7-м суткам порядка 2-4 мм. Дальнейшее термическое воздействие на образцы недельного возраста не вызвало прироста деформаций. Это указывает на то, что реакции, обусловленные гидратацией свободного СаО, полностью завершились к 7-суточному сроку, не спровоцировав критического увеличения объема материала. Следовательно, в системах с ВЗУ-1 (содержание свободной извести ~8,7 %) при 20 °С весь объем свободного оксида кальция успевает вступить в реакцию до окончательного структурообразования камня или параллельно с ним. Благодаря этому в структуре не возникает опасных растягивающих напряжений.

Максимальный уровень деформаций наблюдается при немедленной гидротермальной обработке свежешелющенного и схватившегося теста. В условиях повышенных температур ускоряется упрочнение матрицы, из-за чего гидратация СаО протекает уже в жестком каркасе затвердевшего материала, вызывая его расширение.

Суточная выдержка образцов в нормальных температурных условиях перед началом тепловой обработки способствует минимизации деформаций. Это объясняется тем, что значительная часть свободного СаО успевает гидратироваться еще до окончательного формирования жесткого каркаса материала. Таким образом, масштаб деструктивных изменений объема определяется конкуренцией двух процессов: скоростью структурообразования и темпами гидратации свободного оксида кальция. Равновесие данных показателей определяется как суммарным содержанием свободного оксида кальция ($\text{СаО}_{\text{св}}$) в смеси, так и установленными параметрами термического воздействия.

Опытным путем доказано, что исключение из рецептуры низкокальцевой золы-уноса (НЗУ) с её замещением неактивным тонкомолотым кварцем (частицы < 40 мкм) ведет к интенсивному увеличению объемного расширения. Эта закономерность сохраняется независимо от условий созревания образцов (см. табл. 2, образец 4). Результаты испытаний подтверждают: благодаря своим пуццолановым свойствам, НЗУ выступает критически важным агентом в процессе хемосорбции свободного СаО. Таким образом, она предотвращает возникновение деструктивных напряжений в структуре цементного камня в ходе его гидратационного твердения.

Смеси, приготовленные с использованием ВЗУ-2, склонны к значительным линейным деформациям, следствием которых часто становится сквозное трещинообразование (см. левую часть рис. 5). Минимизация этого негативного эффекта достигается путем реализации ряда технологических решений: увеличения удельной поверхности зольного компонента (тонкий помол), лимитирования его содержания в составе (не более 30 %), а также обеспечения длительного периода влажностного твердения при 20 °С. Данный подход направлен на завершение основных процессов гидратации свободного оксида кальция ($\text{СаО}_{\text{св}}$) до момента окончательного структурообразования и набора жесткости матрицей материала. Тем не менее, указанные способы дают лишь частичный результат, так как показатели расширения по методике Ле-Шателье по-прежнему выходят за пределы допустимого порога в 10 мм.



Рисунок 5 – Визуальные характеристики образцов (номера 11, 13, 14 соответственно) после 7 суток твердения (условия: 20 °С, влажность 95 %)

Figure 5 – Visual characteristics of specimens (Nos. 11, 13, and 14, respectively) after 7 days of curing (conditions: 20 °C, humidity 95%)

Применение ультрадисперсных пуццолановых добавок

Выявленное ранее позитивное влияние низкокальцевой золы на стабилизацию объема позволяет допустить, что использование кремнеземистых модификаторов с более выраженной пуццолановой способностью даст еще более значимый результат. В литературе [11] упоминается применение микрокремнезема («МКУ-85») для нейтрализации деформаций ВЗУ, однако для достижения цели требовалась высокая концентрация добавки – от 30 до 40 % от общей массы. В данном исследовании для минимизации расширения в систему «ВЗУ – НЗУ» внедрялись не только микрокремнезем, но и высокотехнологичные формы SiO_2 с более высокой дисперсностью: осажденный кремнезем и стабилизированный коллоидный золь.

Экспериментальные данные подтверждают, что добавление всего 1 % SiO_2 в форме 3,3 %-ной коллоидной дисперсии (размер частиц порядка 10 нм) полностью блокирует деформации расширения в образцах с равным содержанием ВЗУ-1 и НЗУ. Этот эффект стабильно проявляется, как при нормальном твердении (20 °С), так и в процессе гидротермальной обработки (см. рис. 4).

Включение ультрадисперсных частиц SiO_2 в составы, содержащие 30-40 % ВЗУ-2, способствует минимизации деформационных процессов. При этом различные формы кремнеземистых добавок демонстрируют близкую эффективность, хотя прослеживается закономерное усиление их действия в последовательности: микрокремнезем → осажденный SiO_2 → коллоидный SiO_2 . Для соблюдения нормативных требований по стабильности объема необходимо придерживаться следующих условий: доля ВЗУ-2 в системе не должна превышать 30 %, концентрация высокодисперсного SiO_2 должна составлять минимум 1 % от веса вяжущего, а период предварительного твердения при 20 °С должен длиться не менее недели (особенно перед гидротермальной обработкой). Дополнительно стабилизировать объем и одновременно увеличить прочностные показатели (см. рис. 3) позволяет механическая активация золы путем её доизмельчения.

Механизм влияния высокодисперсного SiO_2 основан на химической фиксации ионов кальция, которые выделяются в процессе плавной гидратации свободного оксида кальция (CaO). В результате взаимодействия формируется аморфный гель типа С – S – Н, который, в отличие от продуктов свободной гидратации, не генерирует критических растягивающих напряжений внутри сформированного каркаса. При отсутствии пуццоланового модификатора в поровом пространстве материала происходит избыточное накопление гидроксида кальция Ca(OH)_2 . Напряжения, генерируемые в процессе роста кристаллов данного новообразования, вызывают необратимые структурные повреждения и разрушение матрицы искусственного камня.

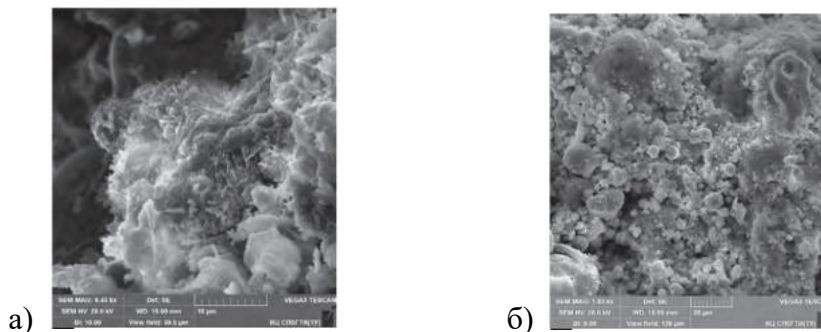


Рисунок 6 – Особенности микроструктуры образцов (получено методом СЭМ в режиме детектирования вторичных электронов): (а) — области локализации пластинчатых новообразований портландита Ca(OH)_2 в контрольном составе №11; (б) — плотная однородная матрица с преобладанием аморфной составляющей в модифицированной смеси №13

Figure 6 – Microstructural features of specimens (obtained by SEM in secondary electron detection mode): (a) — localization areas of platy portlandite Ca(OH)_2 precipitates in control mix No. 11; (b) — dense homogeneous matrix dominated by the amorphous component in modified mixture No. 13

Предложенная теоретическая концепция находит свое подтверждение в данных сканирующей электронной микроскопии (см. рис. 6). На микроснимках эталонного образца (не содержащего SiO_2) фиксируется массовое скопление гексагональных пластинчатых кристаллов портландита Ca(OH)_2 . Напротив, микроморфология системы, модифицированной микрокремнеземом, отличается выраженной однородностью с доминированием аморфных новообразований. Контрольные замеры выполнялись спустя две недели созревания в стандартных температурно-влажностных условиях (20 °С).

Эффективность использования нанодисперсного SiO_2 ограничена определенным лимитом: двукратное увеличение концентрации золя кремнезема не способно компенсировать интенсивные деформации в рецептурах, лишенных низкокальциевого зольного компонента (образец №6). Кроме того, защитное действие модификатора существенно нивелируется при немедленном начале термообработки сразу после завершения процесса схватывания. Это критично для смесей с избыточным содержанием свободного CaO (в частности, на основе ВЗУ-2). Механизм данного процесса заключается в том, что при термической активации активный кремнезем практически полностью поглощается при формировании ранней структуры камня. В результате к моменту поздней гидратации извести запас добавки исчерпывается, что приводит к разрушению структуры по схеме, характерной для немодифицированных составов.

Без использования модифицирующих добавок на основе SiO_2 образцы демонстрируют склонность к самопроизвольному разрушению уже после непродолжительной экспозиции (несколько суток) в условиях 100 % влажности при 20 °С. Главным фактором деструкции выступают интенсивные деформации расширения, провоцирующие нарушение целостности и растрескивание камня. В тех же условиях системы, обогащенные диоксидом кремния, не только сохраняют структурную стабильность, но и показывают поступательное увеличение прочностных показателей. Стоит отметить, что отложенная на 7 суток гидротермальная обработка позволяет достичь прочностных показателей, почти вдвое превышающих результаты при немедленном тепловом воздействии. Данные наблюдения полностью коррелируют с результатами испытаний в кольцах Ле-Шателье, описанными ранее.

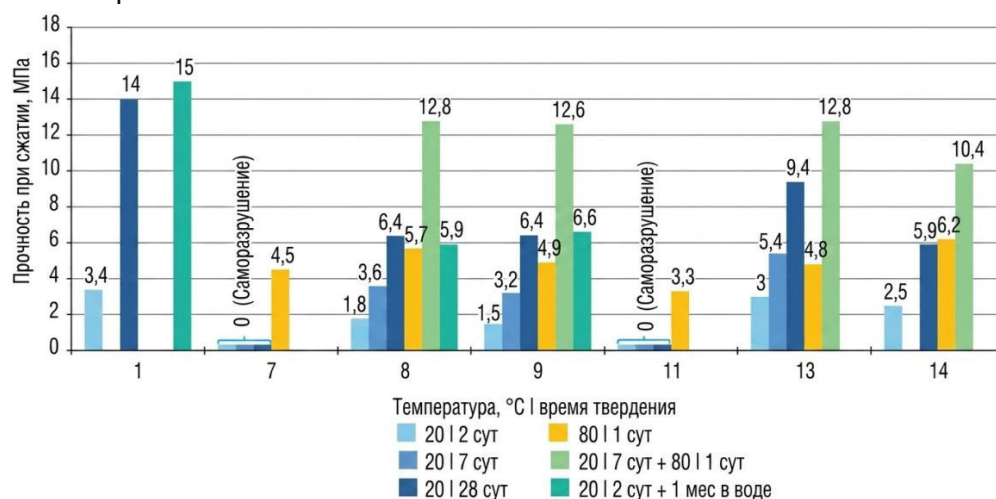


Рисунок 7 – Влияние добавок высокодисперсного диоксида кремния на прочностные характеристики и структурную целостность образцов на основе нативной (немолотой) ВЗУ-2

Figure 7 – Influence of highly dispersed silicon dioxide additives on the strength characteristics and structural integrity of specimens based on native (unground) VZU-2

Установлено, что уже после 24-48 часов предварительного влажного созревания при комнатной температуре образцы допускают хранение непосредственно в водной среде. При этом темпы набора прочности остаются идентичными показателям при хранении в условиях 95 %-ной влажности (см. рис. 7).

Заключение

Сочетание высококальциевой и низкокальциевой зол-уноса с добавлением щелочного активатора (Na_2CO_3) позволяет создать эффективную систему бесклнкерного гидравлического вяжущего. Процесс гидратации таких композиций при затворении водой обеспечивает формирование искусственного камня, предел прочности которого на сжатие достигает 10-20 МПа.

На эксплуатационную надежность и прочностные характеристики формируемой структуры отрицательно влияют побочные эффекты гидратации свободного оксида кальция (CaO), присутствующего в высококальциевой золе. Минимизировать разрушительное воздействие этих факторов возможно путем оптимизации состава вяжущего: снижения доли высококальциевой зольной фракции при одновременном наращивании содержания пуццоланового компонента (кислой золы). Дополнительными мерами по стабилизации камня служат повышение удельной

поверхности высококальциевой золы (интенсивный помол) и корректировка температурного режима, исключая тепловое воздействие до полного завершения химических реакций свободного СаО.

Рост концентрации свободного СаО в высококальциевой золе диктует необходимость снижения её дозировки в рецептуре вяжущего и одновременно требует интенсификации процесса её механического доизмельчения. Эффективным инструментом нейтрализации деструктивного воздействия свободного оксида кальция является модификация состава ультрадисперсными кремнеземистыми добавками (коллоидным SiO₂, микрокремнеземом или осажденным кремнеземом). Механизм их действия основан на химической фиксации извести с образованием геля типа С – S – Н. Применение данных модификаторов в сочетании с ранее упомянутыми технологическими приемами обеспечивает надежный контроль объемных деформаций в рамках нормативных допусков.

Рецензент: Каландарбеков И. – д.т.н., профессор кафедры «Промышленное и гражданское строительство» ПГТУ им. акад. М.С. Осими

Литература

1. Истомина, К.Р. Возможные технологии использования золы уноса / К.Р. Истомина, А.М. Бургунутдинов, К.А. Хусаинова // Транспорт. Транспортные сооружения. Экология. – 2022. – № 1. – С. 36–44.
2. Kelechi, S.E. A comprehensive review on coal fly ash and its application in the construction industry / S.E. Kelechi, M. Adamu, O.A. Uche, I.P. Okopujie et al. // Cogent Engineering. – 2022. – Vol. 9. – Art. 2114201.
3. Золотова, И.Ю. Риски сохранения текущей системы утилизации продуктов сжигания твердого топлива угольных ТЭС в России / И.Ю. Золотова // Стратегические решения и риск-менеджмент. – 2020. – Т. 11. – № 2. – С. 172–181. – DOI: 10.17747/2618-947X-2020-2-171-181.
4. Пичугин, Е.А. Аналитический обзор накопленного в Российской Федерации опыта вовлечения в хозяйственный оборот золошлаковых отходов теплоэлектростанций / Е.А. Пичугин // Проблемы региональной экологии. – 2019. – № 4. – С. 77–87.
5. Немущенко, Д.А. Исследование зол уноса угольных электростанций как потенциального сырья для строительной индустрии / Д.А. Немущенко, В.В. Ларичкин // Эксперт: теория и практика. – 2023. – № 2(21). – С. 60–67. – DOI: 10.51608/26867818-2023-2-60.
6. Сниккарс, П.Н. Утилизация золошлаков ТЭС как новая кросс-отраслевая задача / П.Н. Сниккарс, И.Ю. Золотова, Н.А. Осокин // Энергетическая политика. – 2020. – № 7(149). – С. 34–45.
7. Tariq, A. A review of binders used in cemented paste tailing for underground and surface disposal practices / A. Tariq, E.K. Yanful // Journal of Environmental Management. – 2013. – Vol. 131. – P. 138–149.
8. Brennan, P. Northwich — grouting using 1000000 tonnes of conditioned PFA from Drax Power Station / P. Brennan // World of Coal Ash (WOCA). – Northern Kentucky, USA, 2007. – May 7–10.
9. Alkali-Activated Materials. State of the Art Report / Eds.: J.L. Provis, J.S.J. van Deventer. – RILEM TC 224-AAM. – Springer, 2014. – 388 p.
10. Энтин, З.Б. Еще раз о золах-уносе ТЭС для производства цемента / З.Б. Энтин, Н. Стржалковская // Цемент и его применение. – 2009. – № 2. – С. 106–111.
11. Usanova, K.Y. Neutralization of high-calcium fly ash expansion / K.Y. Usanova, Y.G. Barabanshchikov, A.V. Uhanov, A.I. Kalachev // Construction of Unique Buildings and Structures. – 2022. – Vol. 103. – Art. 10302. – DOI: 10.4123/CUBS.103.2.
12. Sevinç, A.H. Properties of high-calcium fly ash-based geopolymer concretes improved with high-silica sources / A.H. Sevinç, M.Y. Durgun // Construction and Building Materials. – 2020. – Vol. 261. – Art. 120014.
13. Nuaklong, P. Properties of high-calcium and low-calcium fly ash combination geopolymer mortar containing recycled aggregate / P. Nuaklong, A. Wongsu, V. Sata, K. Boonserm et al. // Heliyon. – 2019. – Vol. 5. – Art. e02513.
14. Абдуганиев, А. М. Применение углеотходов при сухом способе производства цемента / А. М. Абдуганиев, А. А. Акрамов, М. З. Сиддигов // Наука-основа инновационного развития: Материалы X Международной научно-практической конференции, Душанбе, 17–18 апреля 2025 года. – Душанбе: Таджикский технический университет им. акад. М.С. Осими, 2025. – С. 138–141. – EDN MYSQVP.

References

1. Istomina, K.R. Possible Technologies for the Utilization of Fly Ash / K.R. Istomina, A.M. Burgonutdinov, K.A. Khusainova // Transport. Transport Facilities. Ecology. – 2022. – № 1. – P. 36–44.
2. Kelechi, S.E. A Comprehensive Review on Coal Fly Ash and Its Application in the Construction Industry / S.E. Kelechi, M. Adamu, O.A. Uche, I.P. Okopujie et al. // Cogent Engineering. – 2022. – Vol. 9. – Art. 2114201.
3. Zolotova, I.Yu. Risks of Maintaining the Current System of Coal-Fired Thermal Power Plant Combustion By-Product Utilization in Russia / I.Yu. Zolotova // Strategic Decisions and Risk Management. – 2020. – Vol. 11. – № 2. – P. 172–181. – DOI: 10.17747/2618-947X-2020-2-171-181.
4. Pichugin, E.A. Analytical Review of the Experience Accumulated in the Russian Federation on the Commercial Utilization of Ash and Slag Waste from Thermal Power Plants / E.A. Pichugin // Problems of Regional Ecology. – 2019. – № 4. – P. 77–87.

5. Nemushchenko, D.A. Investigation of Coal Power Plant Fly Ash as a Potential Raw Material for the Construction Industry / D.A. Nemushchenko, V.V. Larichkin // Expert: Theory and Practice. – 2023. – № 2(21). – P. 60–67. – DOI: 10.51608/26867818-2023-2-60.
6. Snikkars, P.N. Utilization of Thermal Power Plant Ash and Slag as a New Cross-Industry Challenge / P.N. Snikkars, I.Yu. Zolotova, N.A. Osokin // Energy Policy. – 2020. – № 7(149). – P. 34–45.
7. Tariq, A. A Review of Binders Used in Cemented Paste Tailings for Underground and Surface Disposal Practices / A. Tariq, E.K. Yanful // Journal of Environmental Management. – 2013. – Vol. 131. – P. 138–149.
8. Brennan, P. Northwich—Grouting Using 1,000,000 Tonnes of Conditioned Pulverized Fuel Ash (PFA) from Drax Power Station / P. Brennan // World of Coal Ash (WOCA). – Northern Kentucky, USA, 2007. – May 7–10.
9. Alkali-Activated Materials: State of the Art Report / Eds.: J.L. Provis, J.S.J. van Deventer. – RILEM TC 224-AAM. – Springer, 2014. – 388 p.
10. Entin, Z.B. Once Again on Fly Ash from Thermal Power Plants for Cement Production / Z.B. Entin, N. Strzhalkovskaya // Cement and Its Applications. – 2009. – № 2. – P. 106–111.
11. Usanova, K.Y. Neutralization of High-Calcium Fly Ash Expansion / K.Y. Usanova, Y.G. Barabanshchikov, A.V. Uhanov, A.I. Kalachev // Construction of Unique Buildings and Structures. – 2022. – Vol. 103. – Art. 10302. – DOI: 10.4123/CUBS.103.2.
12. Sevinç, A.H. Properties of High-Calcium Fly Ash-Based Geopolymer Concretes Improved with High-Silica Sources / A.H. Sevinç, M.Y. Durgun // Construction and Building Materials. – 2020. – Vol. 261. – Art. 120014.
13. Nuaklong, P. Properties of High-Calcium and Low-Calcium Fly Ash Combination Geopolymer Mortar Containing Recycled Aggregate / P. Nuaklong, A. Wongs, V. Sata, K. Boonserm et al. // Heliyon. – 2019. – Vol. 5. – Art. e02513.
14. Abduganiyev, A.M. Application of Coal Waste in the Dry Process of Cement Production / A.M. Abduganiyev, A.A. Akramov, M.Z. Siddikov // Science as the Foundation of Innovative Development: Proceedings of the 10th International Scientific and Practical Conference. – Dushanbe, April 17–18, 2025. – Dushanbe: Tajik Technical University named after Academician M.S. Osimi, 2025. – P. 138–141.

МАЪЛУМОТ ДАР БОРАИ МУАЛЛИФОН- СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ- INFORMATION ABOUT AUTHORS

TJ	RU	EN
Муминов Ихтиёр Субхонкулович	Муминов Ихтиёр Субхонкулович	Muminov Ikhtiyor Subkhonkulovich
Муаллими калон	Старший преподаватель	Senior lecturer
ДТТ ба номи ақд. М.С. Осимӣ	ТТУ им. ақад. М.С. Осими	TTU named after Acadtmician M.S. Osimi
TJ	RU	EN
Акрамов Авазҷон Абдуллоевич	Акрамов Авазҷон Абдуллоевич	Akramov Avazjon Abdulloevich
Номзади илмҳои техники, дотсент	Кандидат технических наук, доцент	Candidate of technical sciences, assistant professor
ДТТ ба номи ақд. М.С. Осимӣ	ТТУ им. ақад. М.С. Осими	TTU named after Acadtmician M.S. Osimi
E-mail: akramov.avaz@mail.ru		
0000-0002-7084-9128		
TJ	RU	EN
Абдурахмонова Гулзора Алимҷоновна	Абдурахманова Гулзора Алимжановна	Abdurakhmanova Gulzora Alimjanovna
Муаллими калон	Старший преподаватель	Senior lecturer
ДТТ ба номи ақд. М.С. Осимӣ	ТТУ им. ақад. М.С. Осими	TTU named after Acadtmician M.S. Osimi
E-mail: b.a1974@mail.ru		
0000-0003-3504-871X		

СОВРЕМЕННЫЕ МОДЕЛИ ПРЕДОСТАВЛЕНИЯ УСЛУГ ВОДОСНАБЖЕНИЯ И ВОДООТВЕДЕНИЯ РЕСПУБЛИКИ ТАДЖИКИСТАН

М.Б. Бердизода, А.Ю. Норматов

Таджикский технический университет имени академика М.С. Осими, г. Душанбе, Республика Таджикистан

В статье проведён комплексный анализ уровня охвата населения услугами питьевого водоснабжения и водоотведения в Республике Таджикистан с учётом регионального распределения, численности населения и типа населённых пунктов. Рассмотрены различия в обеспеченности услугами между городскими и сельскими территориями, а также в разрезе областей. Установлено, что высокий уровень охвата характерен для крупных городов, тогда как в малых населённых пунктах и горных районах наблюдается ограниченный доступ, особенно к услугам водоотведения и санитарии. Проанализированы существующие типы организаций, обеспечивающих предоставление услуг, включая централизованные и децентрализованные формы управления. Выявлены ключевые проблемы отрасли и предложены направления повышения эффективности и устойчивости систем водоснабжения и водоотведения.

Ключевые слова: водоснабжение, водоотведение, горные районы, коммунальная инфраструктура, модели управления, санитария.

МОДЕЛҲОИ МУОСИРИ ТАШКИЛ ВА ИДОРАКУНИИ ХИЗМАТРАСОНИҲОИ ТАЪМИНОТИ ОБИ НЌШОКЌ ВА ОБИХРОЌЌ ДАР ҶУМҲУРИИ ТОҶИКИСТОН

М.Б. Бердизода, А.Ю. Норматов

Донишгоҳи техникии Тоҷикистон ба номи академик М.С. Осимӣ, ш. Душанбе, Ҷумҳурии Тоҷикистон

Дар мақола таҳлили мукаммали сатҳи фарогирии аҳоли бо хизматрасониҳои таъминоти оби нӯшокӣ ва обихроҷӣ дар Ҷумҳурии Тоҷикистон бо дарназардошти тақсими минтақавӣ, шумораи аҳоли ва навъи маҳалҳои аҳолинишин гузаронида шудааст. Тафовут дар сатҳи таъмин бо хизматрасониҳо байни минтақаҳои шаҳрӣ ва деҳот, инчунин дар буриши вилоятҳо баррасӣ гардидааст. Муайян карда шудааст, ки сатҳи баланди фарогирии бештар ба шаҳрҳои калон ҳос буда, дар маҳалҳои аҳолинишини хурд ва ноҳияҳои кӯҳӣ дастрасӣ маҳдуд мебошад, махсусан нисбат ба хизматрасониҳои обихроҷӣ ва санитария. Намудҳои мавҷудаи ташкилотҳое, ки хизматрасониҳоро таъмин менамоянд, аз ҷумла шаклҳои идоракунии мутамарказ ва ғайримутамарказ, таҳлил карда шудаанд. Масъалаҳои асосии соҳа муайян гардида, самтҳои баланд бардоштани самаранокии ва устувории системаҳои таъминоти об ва обпартоӣ пешниҳод шудаанд.

Калидвожаҳо: обтаъминкунӣ, обихроҷӣ, ноҳияҳои кӯҳӣ, инфрасохтори коммуналӣ, моделҳои идоракунии санитария.

MODERN MODELS OF ORGANIZATION AND MANAGEMENT OF DRINKING WATER SUPPLY AND WASTEWATER SERVICES IN THE REPUBLIC OF TAJIKISTAN

M.B. Berdizoda, A.Yu. Normatov

Tajik Technical University named after Academician M.S. Osimi, Dushanbe, Republic of Tajikistan

The article provides a comprehensive analysis of the population coverage level of drinking water supply and wastewater services in the Republic of Tajikistan, taking into account regional distribution, population size, and types of settlements. Differences in service provision between urban and rural areas, as well as across regions, are examined. It is found that a high level of coverage is characteristic of large cities, whereas small settlements and mountainous areas experience limited access, particularly to wastewater and sanitation services. The existing types of organizations providing these services, including centralized and decentralized management forms, are analyzed. Key challenges in the sector are identified, and directions for improving the efficiency and sustainability of water supply and wastewater systems are proposed.

Keywords: water supply, sanitation, mountainous areas, public infrastructure, management models, sanitation.

Введение

Таджикистан характеризуется сложными природными условиями, по меньшей мере 93 процента территории которого занимают горы. Несмотря на богатство природных водных ресурсов, решение проблемы водоснабжения и водоотведения в горных районах является одной из наиболее актуальных задач и социально - инженерных проблем.

Тема исследования указывает на то, что обеспечение питьевой водой малых населенных пунктов и их наиболее отдаленных районов, соответствующей качественным, санитарно-гигиеническим требованиям, создает трудности для развития систем водоснабжения и водоотведения в дорожных условиях, строительства и эксплуатации инженерных сетей, а также других природных факторов.

В этой связи необходимо обеспечить и активизировать поиск новых моделей водоснабжения и водоотведения, чтобы адаптировать их к вышеупомянутым условиям. Данная модель включает

децентрализованные системы водоснабжения, источники управления водными ресурсами, расширенную форму управления, а также комбинированное решение, сочетающее современные технологии очистки и распределения воды.

Не все исследования, проводимые в этой области, являются приемлемыми; необходимы дальнейшие научные и практические исследования для решения подобных проблем и подготовки для развития этой важной области.

Цель и постановка задачи исследования

Цель исследования: анализ современных моделей предоставления услуг водоснабжения и водоотведения в Республике Таджикистан, в том числе в горных районах и разработка рекомендаций по их совершенствованию.

Задачи исследования:

- изучить особенности функционирования систем водоснабжения и водоотведения в РТ и условиях горных регионов;
- проанализировать существующие модели предоставления коммунальных услуг;
- оценить уровень доступности услуг для населения;
- выявить основные проблемы эксплуатации и управления системами;
- предложить направления совершенствования моделей водоснабжения и водоотведения.

Методы исследования

В данной статье применены статистико-аналитический и сравнительный методы, позволяющие оценить уровень охвата населения услугами водоснабжения, водоотведения и санитарии в региональном разрезе. Использован системный подход для комплексного рассмотрения функционирования коммунальной инфраструктуры водного сектора.

Кроме того, проведён анализ вторичных данных, основанный на материалах официальной статистики, обследованиях [2]. Для обобщения результатов применялись методы группировки и сравнительной интерпретации показателей по численности населения и типам населённых пунктов.

По результатам проведённого обследования установлено, что в Республике Таджикистан в настоящее время функционирует 521 организация в сфере питьевого водоснабжения и водоотведения, которые эксплуатируют 628 систем водоснабжения. Данные системы обеспечивают предоставление услуг в 1 039 населённых пунктах, охватывая примерно 4,03 млн человек [1, 3, 6].

При этом уровень обеспеченности существенно различается по регионам страны. Так, город Душанбе практически полностью обеспечен услугами питьевого водоснабжения, тогда как в регионах показатели охвата варьируются от 24% в Хатлонской области до 64% в Горно-Бадахшанской автономной области (ГБАО).

При оценке уровня охвата населения услугами водоснабжения необходимо учитывать не только общий процент обеспеченности, но и плотность населения в административно-территориальных единицах. В настоящее время наибольшая доля населения, продолжающая использовать автономные источники водоснабжения и поверхностные воды без предварительной очистки для питьевых целей, сосредоточена в Хатлонской области.

Для более детального анализа в таблице 1 приведены данные об уровне охвата населения услугами водоснабжения, предоставляемыми соответствующими организациями питьевого водоснабжения, в разрезе регионов и численности населения. Представленная информация позволяет более объективно оценить существующую ситуацию и выявить территориальные различия в обеспеченности услугами водоснабжения.

В результате анализа установлено, что уровень доступности систем водоснабжения в Республике Таджикистан существенно варьируется в зависимости от типа населённого пункта. В крупных городах наблюдается относительно высокий уровень обеспеченности услугами водоснабжения, тогда как в средних и малых населённых пунктах, особенно расположенных в сельской местности, данный показатель остаётся значительно ниже.

Таблица 1 - Региональное распределение уровня охвата населения услугами питьевого водоснабжения с учётом численности населения

Table 1 – Regional distribution of the population coverage rate with drinking water supply services taking into account the population size

	Количество населенных пунктов	Охват услугами питьевого водоснабжения (в %)					
		Всего	Душанбе	РРП	ГБАО	Хатлон	Согд
Населенные пункты до 1000 чел.	1762			-	54%	-	0%
Населенные пункты от 1000 до 5000 чел.	2045			18%	59%	0%	71%
Населенные пункты от 5000 до 15000	294			22%	58%	21%	35%
Населенные пункты от 15000 до 50000	108			32%	100%	22%	35%
Населенные пункты от 50000 до 150000	13			65%	-	43%	42%
Населенные пункты более 150000 чел.	2		99%	-	-	-	100%
Всего	4224		99%	31%	64%	24%	41%

При этом ситуация с системой водоотведения характеризуется ещё более низким уровнем охвата, который фиксируется даже в крупных и средних городах, что указывает на сохраняющиеся инфраструктурные ограничения в данной сфере.

В целом, обеспеченность населения услугами питьевого водоснабжения и водоотведения в стране отличается выраженной территориальной и демографической неоднородностью. Наиболее благоприятные показатели отмечаются в крупных городах и административных центрах, тогда как сельские населённые пункты остаются наименее обеспеченными.

Сводные результаты анализа уровня охвата населения услугами питьевого водоснабжения и водоотведения в зависимости от численности населённых пунктов представлены в таблице 2.

Таблица 2 - Охват услугами ПВСиВ в населенных пунктах – по диапазону населенности

Table 2 – Service coverage in settlements by population range

Количество проживаемого населения (чел.)	% от общего количества населенных пунктов	% от общей численности населения	Текущий охват услугами	
			Водоснабжение (в %)	Водоотведение (в %)
менее 1000 жителей	42%	6%	17%	0%
от 1000 до 5000	48%	39%	21%	0%
от 5000 до 15000	7%	16%	21%	0%
от 10000 до 50000	3%	16%	52%	14%
от 50000-150000	0%	7%	67%	42%
Более 150000 жителей	0%	15%	99%	67%
По стране			41%	15%

Как следует из данных, приведённых в таблице 2, уровень охвата услугами водоснабжения и водоотведения в значительной степени определяется численностью населения населённых пунктов. В малых поселениях (до 5 тыс. жителей), где проживает около 45% населения, обеспеченность услугами водоснабжения остаётся низкой и составляет 17–21%, при этом системы водоотведения практически отсутствуют.

В крупных городах (свыше 150 тыс. жителей), на долю которых приходится около 15% населения, уровень обеспеченности значительно выше: водоснабжением охвачено до 99% населения, а услугами водоотведения — около 67%. Таким образом, наблюдается выраженная диспропорция, при которой с увеличением численности населённого пункта уровень обеспеченности коммунальными услугами существенно возрастает.

В среднем по стране охват населения услугами водоснабжения составляет около 41%, тогда как водоотведением — лишь 15%, что свидетельствует о недостаточном развитии соответствующей инфраструктуры, особенно в сельских районах.

Система водоотведения в населённых пунктах страны обслуживается 40 организациями питьевого водоснабжения и водоотведения, которые эксплуатируют 51 систему водоотведения. Данные организации обеспечивают услуги в 201 населённом пункте, охватывая около 1,49 млн человек. Следует отметить, что в отдельных малых населённых пунктах Согдийской области частично функционируют частные организации водоснабжения и водоотведения.

В целом по республике уровень охвата услугами водоотведения составляет около 15% населения. Наиболее высокий показатель наблюдается в городе Душанбе — около 70%. В регионах страны данный показатель существенно ниже и варьируется от 5% в Горно-Бадахшанской автономной области до 9% в Согдийской области.

Ниже на рисунке 1 представлена информация о степени охвата услугами водоотведения в разрезе областей с учётом численности населения, что позволяет провести более наглядную оценку существующих региональных различий в уровне обеспеченности данными услугами.

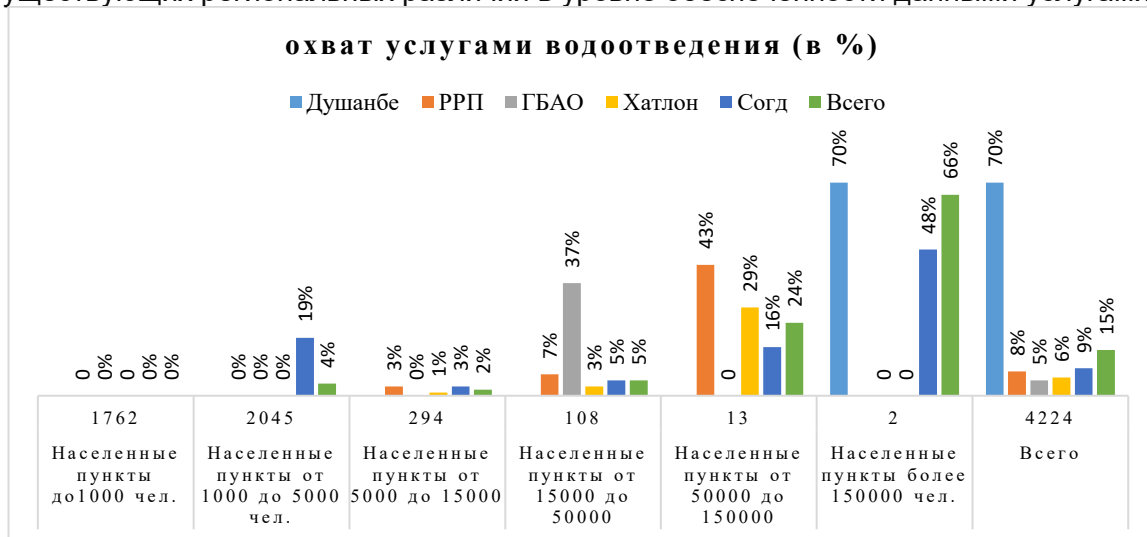


Рисунок 1 - Степень охвата услугами водоотведения в разрезе областей с количеством населения

Figure 1 – Wastewater service coverage rate by region with population size

По результатам различных исследований установлено, что, несмотря на ограниченный охват населения услугами централизованного водоотведения, общий уровень санитарного обеспечения домохозяйств, выраженный наличием туалетов, является относительно высоким и превышает 90%. Вместе с тем качество и техническое состояние таких санитарных систем в большинстве случаев не соответствуют современным требованиям охраны окружающей среды и обеспечения общественного здоровья.

В сельской местности преобладает базовый уровень санитарного обслуживания, которым охвачено около 97,8% населения. Наиболее распространённой практикой является использование индивидуальных выгребных ям, размещённых на территории домохозяйств. В ряде малых населённых пунктов, где отсутствуют централизованные водоотводящие сети, также применяются групповые выгребные ямы для обслуживания нескольких домов или квартир.

Согласно классификации [2,6], доля смывных туалетов, подключённых к септическим системам, остаётся незначительной. В сельской местности около 59% населения имеют доступ к безопасно управляемым улучшенным санитарным условиям, при которых санитарные устройства

расположены на территории домохозяйства, не используются совместно и обеспечивают безопасное удаление и обработку сточных вод как на месте, так и за его пределами.

Кроме того, около 39% сельского населения обеспечено базовыми санитарными услугами, включающими использование улучшенных санитарно-технических сооружений, не находящихся в совместном пользовании с другими домохозяйствами. В городских населённых пунктах ситуация значительно лучше: около 94% населения имеют доступ к базовым санитарным услугам.

По данным рисунка 2 (обследование Всемирного банка, 2017 г.) уровень охвата домохозяйств услугами санитарии в разрезе регионов Республики Таджикистан характеризуется выраженной структурной дифференциацией.

В целом, уровень доступа к улучшенным санитарно-техническим условиям (СТУ) остаётся относительно высоким во всех регионах и составляет от 94% в городе Душанбе до 97,5% в РРП, 95% в ГБАО, 97,5% в Хатлонской области и 96% в Согдийской области. Это указывает на широкое распространение базовых санитарных условий в стране.

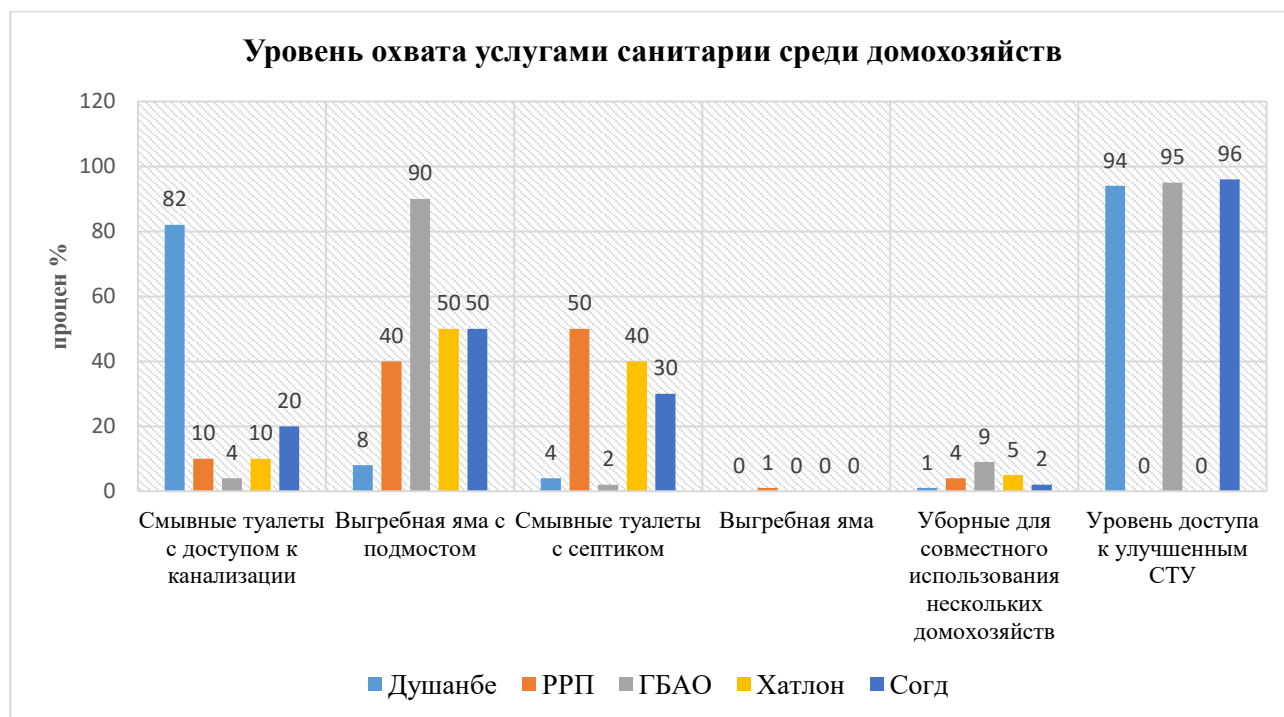


Рисунок 2 - Уровень охвата услугами санитарии среди домохозяйств (Данные обследования Всемирного банка, 2017)
Figure 2 – Sanitation service coverage rate among households (World Bank survey data, 2017)

При этом структура используемых санитарных систем существенно различается. В Душанбе преобладают смывные туалеты, подключённые к централизованной канализации (82%), тогда как в регионах этот показатель значительно ниже (4–20%). В сельских районах доминирует использование выгребных ям с подмоном, особенно в ГБАО (90%) и Хатлонской области (50%). Также значительную долю составляют смывные туалеты с септиками, особенно в РРП (50%) и Согдийской области (30%). Использование простых выгребных ям и уборных совместного пользования в целом имеет низкую долю (0–9%), что свидетельствует о постепенном переходе к более улучшенным санитарным решениям.

Таким образом, несмотря на улучшение санитарных условий, существуют региональные различия в типах используемых систем, что требует различий в инфраструктуре инженерных сетей и наличия централизованных водоотводящих сетей. В общей сложности 25% населённых пунктов, или (1039), обеспечены системой водоснабжения. Наличие централизованной системы водоотведения составляет 4,8%, или (201), что является низким показателем водоотведения при наличии различий в водоснабжении.

В Таджикистане в сфере эксплуатации систем водоснабжения и водоотведения действуют и работают различные типы организаций, которые в зависимости от сферы своей деятельности удовлетворяют потребности таких систем, как описано ниже.



Рисунок 3 -Различные типы организаций Республики Таджикистан
Figure 3 – Various types of organizations in the Republic of Tajikistan

Организации водоснабжения и водоотведения имеют разные формы собственности. Местные исполнительные органы обслуживают 16% населения, предприятия ГУП «ЖКХ» — также 16%. В сельской местности действуют 416 общественных организаций водопользователей, при этом частные структуры представлены незначительно.

Результаты и обсуждение

В результате проведённого анализа установлено, что уровень обеспеченности населения услугами водоснабжения и водоотведения в Республике Таджикистан существенно различается по регионам и типам населённых пунктов. Наиболее высокий уровень охвата наблюдается в крупных городах, тогда как в сельской местности он остаётся значительно ниже.

Полученные данные свидетельствуют о том, что в малых населённых пунктах (до 5 тыс. жителей) уровень водоснабжения составляет 17–21%, при практически полном отсутствии систем водоотведения. В крупных городах (свыше 150 тыс. жителей) показатели значительно выше и достигают 99% по водоснабжению и около 67% по водоотведению. В среднем по стране охват составляет 41% по водоснабжению и около 15% по водоотведению. Результаты показывают, что в связи с ростом населения и увеличением спроса на водоснабжение и водоотведение необходимо завершить ряд крупных работ, главным образом в районах со сложным рельефом и сельской местности.

Таким образом, полученные результаты демонстрируют необходимость дальнейшего развития децентрализованных и устойчивых моделей водоснабжения и водоотведения, особенно в сельских и горных районах страны, а также достижения хороших научных и исследовательских результатов.

Выводы

Проведённый анализ показал, что уровень обеспеченности населения услугами водоснабжения и водоотведения в республике существенно различается по регионам и типам населённых пунктов, при этом крупные города обеспечены водой лучше, чем в сельской местности небольшие поселения.

1. Наблюдается значительная региональная и территориальная неравномерность в обеспечении населения услугами водоснабжения и водоотведения.

2. Высокий уровень охвата наблюдается для крупных городов, а низкий остаётся в сельских и малых населённых пунктах.

3. Развитие системы водоотведения существенно слабее, чем водоснабжения, особенно

в сельской местности.

4. В малых населённых пунктах преобладают автономные и санитарные решения, то есть используются выгребные ямы.

5. Полученные результаты подтверждают необходимость модернизации всей коммунальной инфраструктуры и внедрения устойчивых децентрализованных моделей водоснабжения и водоотведения, горных регионов страны и сельские малые населённые пункты.

Рецензент: Қаландарбеков И. — д.т.н., профессор кафедры «Промышленное и гражданское строительство» ТПУ им. акад. М.С. Осими.

Литература

1. Марамов, М. Б. Оценка водных ресурсов, состояние и перспективы развития водоснабжения Таджикистана / М. Б. Марамов, А. Ю. Норматов // Политехнический вестник. Серия: Инженерные исследования. – 2019. – № 2(46). – С. 154-158. – EDN LRJLAX.

2. Методическая записка о проведении консультации со страной по подготовленным СПМ оценкам состояния питьевого водоснабжения, санитарии и гигиены в школах. — Ноябрь 2023.

3. Марамов, М. Б. Состояние и перспективы развития водоснабжения в Республике Таджикистан / М. Б. Марамов, А. Норматов, З. А. Набиев // Фундаментальные и прикладные научные исследования: актуальные вопросы, достижения и инновации : сборник статей XXIII Международной научно-практической конференции : в 3 ч., Пенза, 15 мая 2019 года. Том Часть 1. – Пенза: "Наука и Просвещение" (ИП Гуляев Г.Ю.), 2019. – С. 146-149. – EDN ZHAXOH.

4. Правительство Республики Таджикистан. Государственная программа питьевого водоснабжения и водоотведения на период до 2032 года. — Душанбе, 2020.

5. Закон Республики Таджикистан «О питьевом водоснабжении и водоотведении» от 19 июля 2019 года, №1633.

References

1. Maramov, M.B. Assessment of Water Resources, Current State and Prospects for the Development of Water Supply in Tajikistan / M.B. Maramov, A.Yu. Normatov // Polytechnic Bulletin. Series: Engineering Research. – 2019. – № 2(46). – P. 154–158.

2. Methodological Note on Conducting the Country Consultation for the Prepared SDG Baseline Assessments of Drinking Water Supply, Sanitation, and Hygiene in Schools. – November 2023.

3. Maramov, M.B. Current State and Prospects for the Development of Water Supply in the Republic of Tajikistan / M.B. Maramov, A. Normatov, Z.A. Nabiev // Fundamental and Applied Scientific Research: Current Issues, Achievements and Innovations: Proceedings of the 23rd International Scientific and Practical Conference. – Part 1. – Penza, May 15, 2019. – Penza: Nauka i Prosveshchenie, 2019. – P. 146–149.

4. Government of the Republic of Tajikistan. State Program for Drinking Water Supply and Wastewater Disposal until 2032. – Dushanbe, 2020.

5. Law of the Republic of Tajikistan No. 1633 "On Drinking Water Supply and Wastewater Disposal". – July 19, 2019.

МАЪЛУМОТ ДАР БОРАИ МУАЛЛИФОН- СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ- INFORMATION ABOUT AUTHORS

TJ	RU	EN
Бердизода Миргул Бердӣ	Бердизода Миргул Берди	Berdizoda Mirgul Berdi
Номзади илмҳои техники, дотсент	Кандидат технических наук, доцент	Candidate of Technical Sciences
ДТТ ба номи акад. М.С. Осимӣ	ТТУ им. акад.М.С. Осими	TTU named after Acad. M.S. Osimi
E-mail: mirgul_1989@mail.ru ORCID - 0000-0001-9496-1598		
TJ	RU	EN
Норматов Абдурахмон Юсупович	Норматов Абдурахмон Юсупович	Normatov Abdurakhmon Yusupovich
Номзади илмҳои техники, дотсент	Кандидат технических наук, доцент	Candidate of Technical Sciences
ДТТ ба номи акад. М.С. Осимӣ	ТТУ им. акад.М.С. Осими	TTU named after Acad. M.S. Osimi
E-mail: Normatov1949@mail.ru		

**ТРЕБОВАНИЯ И УСЛОВИЯ ПРЕДОСТАВЛЕНИЯ
статей в журнал "Политехнический вестник"**

1. В журнале публикуются статьи научно-практического и проблемного характера, представляющие собой результаты завершённых исследований, обладающие научной новизной и представляющие интерес для широкого круга читателей журнала.

2. Основные требования к статьям, представляемым для публикации в журнале:

- статья (за исключением обзоров) должна содержать новые научные результаты;
- статья должна соответствовать тематике и научному уровню журнала;
- статья должна быть оформлена в полном соответствии с требованиями к оформлению статей (см. пункт 5).

3. Статья представляется в редакцию по электронной почте и в одном экземпляре на бумаге, к которому необходимо приложить электронный носитель текста, идентичного напечатанному, а также две рецензии на статью и справку о результате проверки на оригинальность.

4. Структура статьи

Текст статьи должен быть представлен в формате IMRAD¹ на таджикском, английском или русском языке:

ВВЕДЕНИЕ (Introduction)	Почему проведено исследование? Что было исследовано, или цель исследования, какие гипотезы проверены? Включает: актуальность темы исследования, обзор литературы по теме исследования, постановку проблемы исследования, формулирование цели и задач исследования.
МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ (MATERIALS AND METHODS)	Когда, где и как были проведены исследования? Какие материалы были использованы или кто был включен в выборку? Детально описывают методы и схему экспериментов/наблюдений, позволяющие воспроизвести их результаты, пользуясь только текстом статьи. Описывают материалы, приборы, оборудование и другие условия проведения экспериментов/наблюдений.
РЕЗУЛЬТАТЫ (RESULTS)	Какой ответ был найден. Верно ли была протестирована гипотеза? Представляют фактические результаты исследования (текст, таблицы, графики, диаграммы, уравнения, фотографии, рисунки).
ОБСУЖДЕНИЕ (DISCUSSION)	Что подразумевает ответ и почему это имеет значение? Как это вписывается в то, что нашли другие исследователи? Каковы перспективы для будущих исследований? Содержит интерпретацию полученных результатов исследования, включая: соответствие полученных результатов гипотезе исследования; ограничения исследования и обобщения его результатов; предложения по практическому применению; предложения по направлению будущих исследований.
ЗАКЛЮЧЕНИЕ (CONCLUSION)	Содержит краткие итоги разделов статьи без повторения формулировок, приведенных в них.
БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК (REFERENCES)	СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ (см. п.3).
СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ (AUTHORS' BACKGROUND)	оформляется в конце статьи в следующем виде:

¹ Данный термин составлен из первых букв английских слов: Introduction (Введение), Materials and Methods (Материалы и методы), Results (Результаты) Acknowledgements and Discussion (Обсуждение). Это самый распространенный стиль оформления научных статей, в том числе для журналов Scopus и Web of Science.

Ному насаб, ФИО, Name

Дараҷа ва унвони илмӣ, Степень и должность,

Title²

Ташкилот, Организация, Organization

e-mail

ORCID³ Id

Телефон

КОНФЛИКТ ИНТЕРЕСОВ (CONFLICT OF INTEREST)	Конфликт интересов — это любые отношения или сферы интересов, которые могли бы прямо или косвенно повлиять на вашу работу или сделать её предвзятой. Пример: 1. Конфликт интересов: Автор Х.Х.Х. Владеет акциями Компании Y, которая упомянута в статье. Автор Y.Y.Y. — член комитета XXXX. 2. Если конфликта интересов нет, авторы должны заявить: Авторы заявляют, что у них нет конфликта интересов. Все авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи
ЗАЯВЛЕННЫЙ ВКЛАД АВТОРОВ (AUTHOR CONTRIBUTIONS).	Публикуется для определения вклада каждого автора в исследование. Описание, как именно каждый автор участвовал в работе (предпочтительно), или сообщение о вкладах авторов в процентах или долях (менее желательно). Пример данного раздела: 1. Авторы A1, A2 и A3 придумали и разработали эксперимент, авторы A4 и A5 провели теоретические исследование. Авторы A1 и A6 участвовали в обработке данных. Авторы A1, A2 и A5 участвовали в написании текста статьи. Все авторы участвовали в обсуждении результатов. 2. Все авторы сделали эквивалентный вклад в подготовку публикации
ДОПОЛНИТЕЛЬНО (по желанию автора)	
БЛАГОДАРНОСТИ (опционально) - ACKNOWLEDGEMENT (optional)	Если авторы в конце статьи выражают благодарность или указывают источник финансовой поддержки при выполнении научной работы, то необходимо эту информацию продублировать на английском языке.
ФИНАНСИРОВАНИЕ РАБОТЫ (FUNDING)	Информация о грантах и любой другой финансовой поддержке исследований. Просим не использовать в этом разделе сокращенные названия институтов и спонсирующих организаций.
ДОПОЛНИТЕЛЬНАЯ ИНФОРМАЦИЯ (ADDITIONAL INFORMATION)	В этом разделе могут быть помещены: Нестандартные ссылки. Например, материалы, которые по каким-то причинам не могут быть опубликованы, но могут быть предоставлены авторами по запросу. Дополнительные ссылки на профили авторов (например, ORCID). Названия торговых марок на иностранных языках, которые необходимы для понимания статьи или ссылки на них. Особые сообщения об источнике оригинала статьи (если статья публикуется в переводе). Информация о связанных со статьей, но не опубликованных ранее докладов на конференциях и семинарах.

5. Требования к оформлению статей

² Title can be chosen from: master student, Phd candidate, assistant professor, senior lecture, associate professor, full professor

³ ORCID или Open Researcher and Contributor ID (Открытый идентификатор исследователя и участника) — незапатентованный буквенно-цифровой код, который однозначно идентифицирует научных авторов. www.orcid.org.

Рекомендуемый объем оригинальной статьи – до 10 страниц, обзора – до 15 страниц, включая рисунки, таблицы, библиографический список. В рубрику «Краткие сообщения» принимаются статьи объемом не более 3 страниц, включая 1 таблицу и 2 рисунка.

Рекомендации по набору и оформлению текста

Наименование	Требования	Примечания
Формат страницы	A4	
Параметры страницы и абзаца	отступы сверху и снизу - 2.5 см; слева и справа - 2 см; табуляция - 2 см;	ориентация - книжная
Редактор текста	Microsoft Office Word	
Шрифт	Times New Roman, 12 пунктов	
межстрочный интервал	Одинарный, выравнивание по ширине	Не использовать более одного пробела между словами, пробелы для выравнивания, автоматический запрет переносов, подчеркивания.
Единица измерения	Международная система единиц СИ	
Сокращения терминов и названий	В соответствии с ГОСТ 7.12-93.	должны быть сведены к минимуму
Формулы	Математические формулы следует набирать в формульном редакторе MathTypes Equation или MS Equation, греческие и русские буквы в формулах набирать прямым шрифтом (опция текст), латинские курсивом. Формулы и уравнения печатаются с новой строки и центрируются.	Обозначения величин и простые формулы в тексте и таблицах набирать как элементы текста (а не как объекты формульного редактора). Нумеровать следует только те формулы, на которые есть ссылки в последующем изложении. Нумерация формул сквозная. Повторение одних и тех же данных в тексте, таблицах и рисунках недопустимо
Таблицы	При создании таблиц рекомендуется использовать возможности MS Word (Таблица – Добавить таблицу) или MS Excel. Таблицы должны иметь порядковые номера, название и ссылку в тексте. Таблицу следует располагать в тексте после первого упоминания о ней. Интервал между строчками в таблице можно уменьшать до одинарного, размер шрифта – до 9 пунктов.	Внутри таблицы заголовки пишутся с заглавной буквы, подзаголовки – со строчной, если они составляют одно предложение с заголовком. Заголовки центрируются. Боковые – по центру или слева. Диагональное деление ячеек не рекомендуется. В пустой ячейке обязателен прочерк (тире –). Количество знаков после запятой (точность измерения) должно быть одинаковым.
Рисунки (иллюстрации, графики, диаграммы, схемы)	Должны иметь сквозную нумерацию, название и ссылку в тексте, которую следует располагать в тексте после первого упоминания о рисунке. Рисунки должны иметь расширение, совместимое с MS Word (*JPEG, *BIF, *TIFF (толщина линий не менее 3 пкс) Фотографии должны быть предельно четкими, с разрешением 300 dpi. Максимальный размер рисунка: ширина 150 мм, высота 245 мм. Каждый рисунок должен иметь подрисуночную подпись, в которой дается объяснение всех его элементов. Кривые на рисунках нумеруются арабскими цифрами и комментируются в подписях к рисункам.	Заголовки таблиц и подрисуночные подписи должны быть по возможности лаконичными, а также точно отражающими смысл содержания таблиц и рисунков. Все буквенные обозначения на рисунках необходимо пояснить в основном или подрисуночном текстах. Все надписи на рисунках (наименования осей, цифры на осях, значки точек и комментарии к ним и проч.) должны быть выполнены достаточно крупно, одинаковым шрифтом, чтобы они легко читались при воспроизведении на печати. Наименования осей, единицы измерения физических величин и прочие надписи должны быть выполнены на русском языке. Не допускается наличие рамок вокруг и внутри графиков и диаграмм. Каждый график, диаграмма или схема вставляется в текст как объект MS Excel.

Рукопись должна быть построена следующим образом:

Раздел	Содержание (пример)	Расположение
Индекс УДК ⁴	УДК 62.214.4; 621.791.05	в верхнем левом углу полужирными буквами
Заголовок	НАЗВАНИЕ СТАТЬИ (должен быть информативным и, по возможности, кратким) (на языке оригинала статьи)	В центре полужирными буквами
Авторы	Инициалы и фамилии авторов (на языке оригинала статьи)	В центре полужирными буквами
Организация	Таджикский технический университет имени академика М.С. Осими	В центре полужирными буквами
Реферат (аннотация)	Должен быть информативным и на языке оригинала статьи (таджикском, русском и английском), содержать 800-1200 печатных знаков (120-200 слов). Структура реферата: Введение. Материалы и методы исследования. Результаты исследования. Заключение.	Выровнять по ширине
Ключевые слова	5-6, разделены между собой « , ». (на языке оригинала статьи) Пример: энергосбережение, производство корунда, глинозем, энергопотребление, оптимизация	Выровнять по ширине
На двух других языках приводится: Заголовок Авторы Организация Реферат (аннотация)	перевод названия статьи, авторов ⁵ , организации ⁶ , заголовки и реферат ⁷ и ключевые слова ⁸ на двух других языках	
Статья согласно структуры	Согласно требованиям пункта 4 требования и условия предоставления статей в журнал "Политехнический вестник"	Выровнять по ширине

К статье прилагается (см. <http://vp-es.ttu.tj/>):

1. Сопроводительное письмо (приложение 1А).
2. Авторское заявление (приложение 1Б).
3. Лицензионный договор (приложение 1В).
4. Экспертное заключение о возможности опубликования статьи в открытой печати (приложение 1Г).
5. Рецензия (приложение 1Д).

⁴ Универсальная десятичная классификация (УДК) — система классификации информации, широко используется во всём мире для систематизации произведений науки, литературы и искусства, периодической печати, различных видов документов и организации картотек. Межгосударственный стандарт ГОСТ 7.90—2007. Пример: <https://www.teacode.com/online/udc/>

⁵ В английском переводе фамилии авторов статей представляются согласно системе транслитерации BSI (British Standard Institute). Стандарт BSI обычно применяется в случае, когда требуется корректная транслитерация букв, слов и предложений из кириллического алфавита в латинский в случае оформления библиографических списков с официальным статусом. Им пользуются для того, чтобы попасть в зарубежные базы данных.

⁶ Название организации в английском переводе должно соответствовать официальному, указанному на сайте организации. Непереводимые на английский язык наименования организаций даются в транслитерированном варианте.

⁷ Необходимо использовать правила написания организаций на английском языке: все значимые слова (кроме артиклей и предлогов) должны начинаться с прописной буквы. Совершенно не допускается написание одних смысловых слов с прописной буквы, других — со строчной.

⁸ В английском переводе ключевых слов не должно быть никаких транслитераций с русского языка, кроме непереводимых названий собственных имен, приборов и др. объектов, имеющих собственные названия; также не должен использоваться непереводимый сленг, известный только ограниченному кругу специалистов.

Мухаррири матни русӣ:	М.М. Якубова
Мухаррири матни тоҷикӣ:	Муаллифон
Мухаррири матни англисӣ:	М.М. Бобоева
Ороиши компютерӣ ва тарроҳӣ:	М.А. Иззатуллоев
Редактор русского текста:	М.М. Якубова
Редактор таджикского текста:	Авторская редакция
Редактор английского текста:	М.М. Бобоева
Компьютерный дизайн и верстка:	М.А. Иззатуллоев

Нишонӣ: ш. Душанбе, хиёбони акад. Раҷабовҳо, 10^А
Адрес: г. Душанбе, проспект акад. Ражабовых, 10^А

Ба чоп 26.06.2026 имзо шуд. Ба матбаа 30.06.2026 супорида шуд.
Чопи офсетӣ. Қоғози офсет. Андозаи 60x84 1/8
Адади нашр 50 нусха.

Матбааи Донишгоҳи техникии Тоҷикистон ба номи академик М.С. Осимӣ
ш. Душанбе, кӯчаи акад. Раҷабовҳо, 10^А