

Торайғыров университетінің хабаршысы
ҒЫЛЫМИ ЖУРНАЛЫ

НАУЧНЫЙ ЖУРНАЛ
Вестник Торайғыров университета

Торайғыров университетінің ХАБАРШЫСЫ

Энергетикалық сериясы
1997 жылдан бастап шығады



ВЕСТНИК Торайғыров университета

Энергетическая серия
Издается с 1997 года

ISSN 2710-3420

№ 1 (2026)

ПАВЛОДАР

СВИДЕТЕЛЬСТВО

о постановке на переучет периодического печатного издания,
информационного агентства и сетевого издания

№ 14310-Ж

выдано

Министерство информации и общественного развития
Республики Казахстан

Тематическая направленность

публикация материалов в области электроэнергетики,
электротехнологии, автоматизации, автоматизированных и
информационных систем, электромеханики и теплоэнергетики

Подписной индекс – 76136

<https://doi.org/10.48081/BGQF1934>

Бас редакторы – главный редактор

Талипов О. М.

доктор PhD, ассоц. профессор (доцент)

Заместитель главного редактора

Калтаев А.Г., доктор PhD

Ответственный секретарь

Сағындық Ә.Б., доктор PhD

Редакция алқасы – Редакционная коллегия

Клецель М. Я.,	д.т.н., профессор
Никифоров А. С.,	д.т.н., профессор
Новожилов А. Н.,	д.т.н., профессор
Алиферов А. И.,	д.т.н., профессор (Российская Федерация)
Кошеков К. Т.,	д.т.н., профессор
Приходько Е. В.,	к.т.н., профессор
Кислов А. П.,	к.т.н., доцент
Нефтисов А. В.,	доктор PhD
Шерязов С. К.	т.ғ.д., профессор (Российская Федерация)
Искакова З. С.	технический редактор

За достоверность материалов и рекламы ответственность несут авторы и рекламодатели

Редакция оставляет за собой право на отклонение материалов

При использовании материалов журнала ссылка на «Вестник Торайгыров университета» обязательна

© Торайгыров университет

МАЗМҰНЫ
СОДЕРЖАНИЕ
CONTENT

**Азаматов М. Т. , Ярославцев М. В. , Зия Ур Рехман,
Нияз Мухаммад, Ергалиев А. Б.**

Аналитический обзор на применения систем накопления
энергии для Республики Казахстан 6

Айдымбаева Ж. А., Дүйсенбек Ж. С.

Бегимбетова А. С., Сағытаева К. А., Камарова С. Н.

Қоршаған ортаға әсерді азайту мақсатында
ЖЭО Жаңғырту нұсқаларын салыстырмалы талдау 24

K. Akishev, A. Podvalov,

L. Akisheva³, M. Baizharikova⁴, S. Isaev

Intelligent control of electric power in metallurgy 40

A. У. Амренова¹, *Е. Е. Салимов²,

У. Б. Абдыбай³, А. М. Жукешов⁴.....⁵³

Метал-воздушная батарея с анодами
из переходных металлов и его эффективность 53

Ануарбеков М. А., Мергалимова А. К.

Маханова М. А., Ыбрай С. Б., Айтмагамбетова М. Б.

Синтетикалық газдарға арналған жанарғы
тұрақтандырғышының аэродинамикасын сандық модельдеу 67

Аскарова А. С., Болегенова С. А.

Максимов В. Ю., Тоқтаров Д. Д.

Жоғары күлді көмірді тиімді жағу үшін OFA форсункаларын
орнату биіктігін оңтайландыру 79

Aubakirova G. F., Grigorenko O. V., Petrov P. A.

Aytulina A. M., Bekkozhiba B. K.

Analysis of wheat yield factors and prediction using
a neural network model 99

Аханов А. Р., Талипов О. М.

Структурно-параметрический синтез конфигурации программно-
аппаратного комплекса на основании сравнительной оценки
вариантов возможных решений 112

Байжұма Ж. Е., Қаласов Н. Б.,

Сабырова А. Ғ., Молдашева Г. М.

Жел турбинасы қалақшаларының аэродинамикасын халықаралық
стандарт талаптарына сәйкестігін бағалаудың сандық әдісі 128

Барукин А. С., Динмуханбетова А. Ж. , Машрапова Р. М.

Оценка эффективности замены выключателей
в схемах ОРУ подстанций 500 КВ 148

Burumbayev A. G., Makhambetov Ye. N., Sadyk Zh. O., Uakhit N. A.	
Nvestigation of the electrical resistivity of calcined petroleum coke	160
Генбач А. А., Бондарцев Д. Ю., Генбач А. А.	
Теплотехнический потенциал покрытий на основе природных материалов	169
Даулетханова А. М., Ербаев Е. Т., Минажова С. А., Садвакасова А. П., Тананова Д. Д.	
Жасанды интеллект негізіндегі күн бағытын бақылау жүйесін әзірлеу және талдау.....	185
Драганова М. А., Нешина Е. Г.	
Газогенераторный котел на основе пиролизного способа переработки бытовых отходов.....	218
Zhalmagambetova U., Tashlykova R., Larkin V.	
Development of a mathematical model for temperature distribution in a heating system	230
Жанпейісова А. О., Сарсенбаев Е. А.	
Тлешова А. С., Әбілдаева А. С., Омарова А. А.	
Күн және жел энергетикасы жүйелерінде литий-ионды аккумуляторлардың тиімділігін арттыру жолдары.....	240
Исабеков Д. Д.	
Электр қондырғыларының альтернативтік қорғанысы.....	256
Кинжибекова А. К., Досаев Б. И.	
Анализ использования ферросплавного газа в качестве вторичного энергоресурса на предприятии	266
Койшиев Т. К., Бекжан З. Б., Балходжаева Г. Р.	
Технология компоновки и оптимизации поле гелиостатов солнечной электростанции башенного типа.....	276
Куатова А. С., Мехтиева А. Д., Нургаманбетова Г. С.	
Байниязов Б. А., Шукуралиев А. Ш.	
Разработка гибридной ветро-солнечной электростанции с гравитационным накопителем энергии.....	289
Қожагелді Б. Ж., Смагулова Қ. Қ., Шериязов С. К., Налибаев Н. Ж., Мынбаева З. Т.	
Цифровые технологии в обучении системам умного освещения и энергоконтроля	301
Новожилов А. Н., Исабеков Ж. Б., Новожилов Т. Н., Тюлюгенова Л. Б., Исабекова Б. Б.	
Защита двухкабельной линии электропередачи соледобывающей платформы от однофазного замыкания на землю	317

Нүсіпали А., Тайсариева К. Н., Смайлов Н., Аяпберген Ж. К.	
5G инфрақұрылымында оптикалық байланысты пайдалану мүмкіндіктері	329
Рустамов Н. Т., Меирбекова О. Д., Бергузинов А. Н., Калтаев А. Г.	
Гибридная распределенная генерация, работающая на биотопливе	343
Садыкова Л. А., Олейников С. В., Саргужиева Б. А., Буранова Н. Г.	
Перспективы применения сухих газодинамических уплотнений на компрессорных агрегатах нефтеперерабатывающего завода.....	357
Сафарбаков А. А., Олейник С. И., Бекибаев Т. Т., Жапбасбаев У. К.	
Исследование изменения эквивалентной шероховатости элементов тепловой сети во времени	377
Сергеев Я., Сейтенова Г. Ж., Дюсова Р. М.	
Применение пинч-анализа как метода повышения энергоэффективности нефтеперерабатывающих заводов.....	390
Сулейменова Д. Т., Оржанова Ж. К., Мещерякова Т. В., Боканова А. А.	
Таратушы электр желілеріндегі электр энергиясының шығындарын есептеуде ықтималдық-статистикалық әдістерінің қолданылуын талдау	407
Төребек Қ., Кисманова А., Турбекова А., Аджанов А.	
Инфрақызыл басқару жүйесі негізінде жылжымалы робот қозғалысын сақтау және автоматты қайталау алгоритмі.....	423
Авторлар туралы ақпарат	
Правила для авторов	
Information about the authors.....	443
Авторларға арналған ережелер	
Правила для авторов	
Rules for authors	479
Жарияланым этикасы	
Публикационная этика	
Publication ethics.....	491

МРНТИ 44.09.39

<https://doi.org/10.48081/BGQF1935>

***М. Т. Азаматов¹, М. В. Ярославцев², Зия Ур Рехман³,
Нияз Мухаммад⁴, А. Б. Ергалиев⁵**

^{1,2,5}Торайғыров университет,
Республика Казахстан, г. Павлодар

³Университет Куайд-и-Азам,
Пакистан, г. Исламабад

⁴Университет Абдул Вали Хана,
Пакистан, г. Мардан

¹ORCID: <https://orcid.org/0009-0007-6956-0822>

²ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-1440-2065>

³ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-1436-3131>

⁴ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-8431-192X>

⁵ORCID: <https://orcid.org/0009-0001-1315-2615>

*e-mail: muratazamatov@mail.ru

АНАЛИТИЧЕСКИЙ ОБЗОР НА ПРИМЕНЕНИЯ СИСТЕМ НАКОПЛЕНИЯ ЭНЕРГИИ ДЛЯ РЕСПУБЛИКИ КАЗАХСТАН

В работе предложена предполагаемая модель развития энергетики Казахстана, описывающая совместную работу традиционных источников и возобновляемых источников энергии с применением систем накопления энергии.

Рассмотрены факторы, которые влияющие на текущее состояние и возникающие проблемы в энергетике, а также предложены пути их решения. Изучая опыт мирового сообщества, можно с уверенностью сказать, что системы накопления энергии активно внедряются во все отрасли народного хозяйства, начиная от жилых объектов до крупных производственных центров. Активное внедрение возобновляемых источников энергии автоматически повлекло за собой развитие системы накопления энергии как свою неотъемлемую часть развития чистой энергетики.

Исследование режимов потребления и генерации энергии показало, что применение систем накопления энергии во много раз

улучшили показатели, такие как выравнивание внутрисуточной и внутричасовой изменчивости потребления энергии, чем если использовались без применения систем накопления энергии. Комбинация систем накопления энергии с различными вариациями потребления и выработки энергии показывает, как по эффективности, по надёжности, по устойчивости, и по стабильности, экономически лучшие показатели энергосистемы в целом. Несмотря на первоначальные затраты на системы накопления энергии, в долгосрочной перспективе системы накопления энергии значительно снижают расходы на обслуживание всей энергосистемы. Применение систем накопления энергии положительно влияет на развитие и модернизацию экономики страны в сфере энергообеспечения.

Ключевые слова: возобновляемые источники энергии, накопитель энергии, устойчивая энергетическая система, надёжность энергосистемы, развитие энергетики.

Введение

Казахстан активно движется в сторону развития возобновляемых источников энергии (ВИЭ), устанавливая амбициозные цели: достичь 15% доли ВИЭ в производстве электроэнергии к 2030 году и 50% к 2050 году [1]. Для достижения этих целей страна активно сотрудничает с международными партнёрами. В Жамбылской области планируется строительство ветровой электростанции мощностью 1 ГВт совместно с компанией Masdar из ОАЭ, которая будет оснащена современными системами накопления энергии. Французская компания TotalEnergies также реализует аналогичный проект с использованием накопителей. Китайские партнёры намерены внедрить объекты ВИЭ общей мощностью 1,8 ГВт, что подчеркивает масштаб и международный характер энергетического перехода [2].

На сегодняшний день в Казахстане функционирует 156 объектов ВИЭ с общей мощностью 3,1 ГВт. К 2027 году запланировано реализация ещё 91 проекта с суммарной мощностью более 2,2 ГВт, включая крупные ветровые и солнечные электростанции, а также малые гидроэлектростанции. Кроме того, до конца 2027 года должны пройти аукционы по проектам ВИЭ общей мощностью 4,6 ГВт. Особое внимание уделяется развитию систем накопления энергии, которые помогут интегрировать переменную генерацию ВИЭ в национальную энергосистему и обеспечить её устойчивость.

Доля возобновляемых источников энергии в производстве электроэнергии в Казахстане показана в таблице 1. Уже сейчас видно, что

с 2021 года по 2025 год выработка энергии ВИЭ увеличилось в 2 раза в процентном соотношении и будет увеличиваться от года к году [3].

Таблица 1 – Доля возобновляемых источников энергии в производстве электроэнергии в Казахстане

Показатели	Ед. изм.	За 2021 год	За 2022 год	За 2023 год	За 2024 год	За 9 месяцев 2025 года
Установленная мощность, в том числе:	МВт	2 010,32	2 388	2 868,6	3 032,12	3 248,12
ветровые электростанции	МВт	683,95	958	1 394,6	1 520,05	1 670,05
малые ГЭС	МВт	280,98	280	269,605	287,685	313,685
солнечные электростанции	МВт	1 037,61	1 148	1 202,61	1 222,61	1 262,61
биоэлектростанции	МВт	7,82	1,77	1,77	1,77	1,77
Выработка электроэнергии, в том числе:	млн. кВт*ч	4 220,29	5 110	6 675,5	7 581,33	6447
ветровые электростанции	млн. кВт*ч	1 776,41	2 411	3 824,99	4 513,02	3 771,5
малые ГЭС	млн. кВт*ч	799,74	934	993,87	1 177,13	948
солнечные электростанции	млн. кВт*ч	1 641,09	1 763	1 853,95	1 889,59	1 725
биоэлектростанции	млн. кВт*ч	3,04	1,98	2,71	1,58	2,5
Доля вырабатываемой электроэнергии ВИЭ в общем объеме производства электрической энергии	%	3,69	4,53	5,92	6,43	7,17

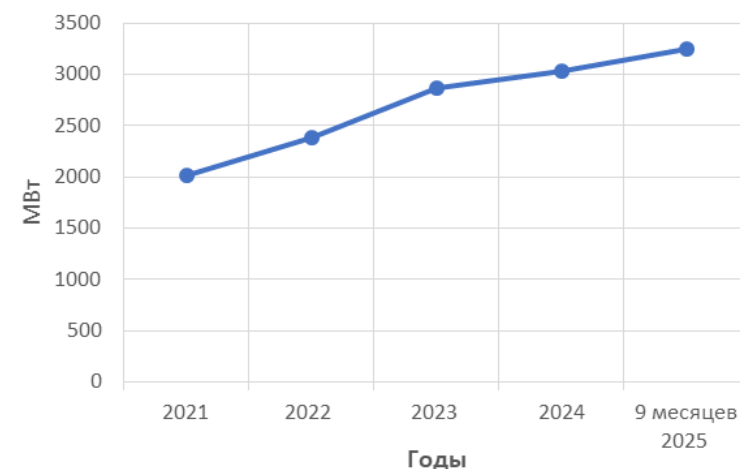


Рисунок 1 – Установленная мощность ВИЭ

Материалы и методы

Проблемы и пути развития энергетической системы Республики Казахстан. Республика Казахстан имеет большую протяженность как с севера на юг, так и с запада на восток. Протяжённость страны с востока на запад составляет 2963 км, а с севера на юг – 1652 км, что оказывает влияние на энергетическую транспортную сеть. Также присутствует неравномерность между основными крупными потребителями и источниками выработки электроэнергии. Основные потребители в южном регионе характеризуются наличием основных потребителей (большая часть населения страны) и с каждым годом растет дефицит энергии в этом регионе, тем самым оказывая дополнительную нагрузку на транспортную сеть.

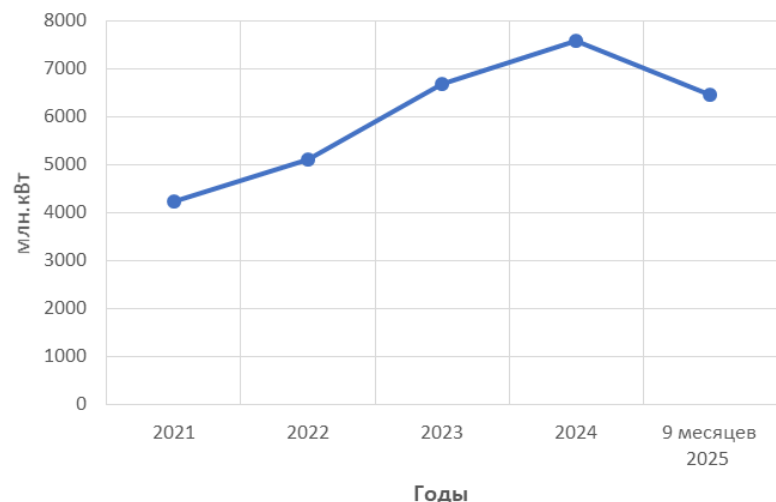


Рисунок 2 – Выработка электроэнергии ВИЭ

Во-первых, на ограничение пропускной способности влияет также и устаревшая энергетическая инфраструктура. Эксплуатируемые магистральные сети строились более 20-30 лет назад и не отвечают текущим потребностям и реалиям. Применение ВИЭ децентрализует генерацию электроэнергии, при их активном развитии ВИЭ, ведь согласно Парижским соглашениям по уменьшению углеродного воздействия РК к 2030 году должен будет сократить выработки «грязной» энергии на 15% по отношению к 1990 году и на 25% при условии получения международной поддержки на декарбонизацию экономики [1].

Это требует нового взгляда на проблему выравнивания выработки и потребления энергии и одним из решений является применение традиционных источников выработки энергии плюс ВИЭ плюс система накопления энергии (СНЭ).

Установка накопителей энергии на любой электрической станции и распределенных накопителей разных типов в энергосистеме, способных оперативно изменять свою генерацию автоматически или по команде диспетчера, оказывается значительно более экономичным вариантом для резервирования генерации солнечных и ветровых электростанций, чем вариант содержания горячего резерва мощности на традиционных электростанциях, используемый сегодня в Казахстане. Это связано с тем, что установка накопителей требует только одноразовых вложений, в то время как

содержание горячего резерва связано с постоянной оплатой расходуемого топлива на множестве электростанций республики в течении даже не одного года. Поэтому в наше время резерв маневренной мощности должен создаваться не за счёт самих традиционных электростанций, что вызывает значительные дополнительные затраты, а за счёт установки накопителей на электрических станциях и расширения накопителей в энергосистеме. А энергокомпании за счёт накопителей могут сдвинуть часы потребления электроэнергии из централизованной сети на период минимальной нагрузки энергосистемы, когда стоимость энергии ниже, а также уменьшить общую нагрузку на транспортные сети.

Стоит подчеркнуть тот факт, что установка систем накопления энергии на приёмном конце электропередачи позволяет распределять передаваемую энергию во времени, что помогает сгладить график загрузки и уменьшить пиковые значения мощности в центре распределения энергии. Это, в свою очередь, позволяет передавать большее количество энергии, не превышая допустимые пределы мощности электропередачи [4].

Во-вторых, это высокая стоимость СНЭ, особенно первоначальные инвестиционные расходы. До 2025 года в РК не было собственного производства СНЭ, а импорт увеличивает расходы и без того достаточно дорогой технологии. В Казахстане началось строительство завода по производству ветрогенераторов и систем накопления энергии, что говорит о том, что правительство РК осуществляет совершенствование нормативной базы и внедряет механизмы финансовой поддержки, а также запуск пилотных проектов. [5]. Согласно мировому опыту, все страны активно развивают СНЭ (рисунок 3) [6].

В-третьих, это резкие перепады между потребностью и выработкой электроэнергии и потреблением в часы пик в будущем могут вызывать отключения потребителей. Следовательно, на сегодняшний момент основными источниками генерации электроэнергии являются угольные тепловые электростанции, которые не могут быстро изменять свою генерацию. Влияние СНЭ на сглаживания пиковых нагрузок демонстрирует рисунок 4 [7].

В-четвертых, возобновляемые источники энергии (ВИЭ) обладают стохастичностью и неравномерным уровнем выработки энергии. Их интеграция в традиционную энергетическую систему невозможна без применения СНЭ.

В-пятых, это внедрение интеллектуальных систем (машинное обучение и искусственный интеллект) в управление энергопотоками, особенно при интеграции ВИЭ и СНЭ. Автоматизация данного процесса в сочетании

с классической диспетчеризацией позволит сократить расходы, как при выработке, так и потреблении, и целом обеспечит надежную работу всей энергосистемы нашей страны. Некоторые примеры, где полезно будет применить ИИ системы при автоматизации технологических процессов, отображены на рисунках 5, 6.

Global cumulative energy storage installations

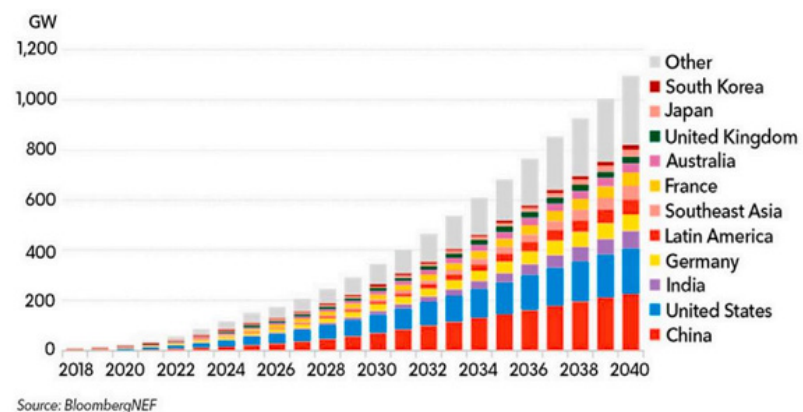


Рисунок 3 – Глобальный прогноз установки накопителей энергии в 2040 году.

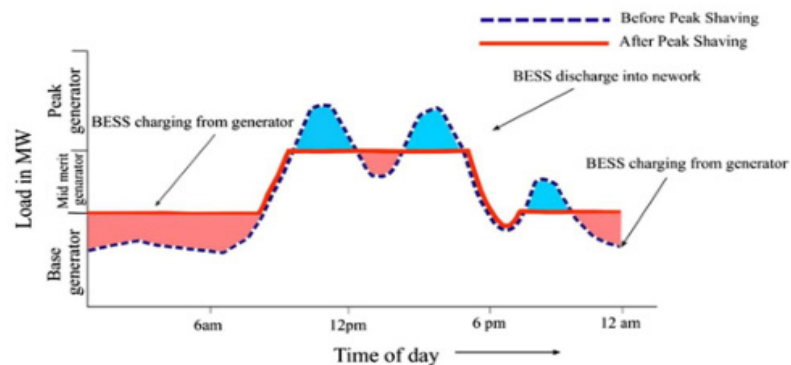


Рисунок 4 – Сглаживание пиковых нагрузок с помощью СНЭ

Пример компенсации дефицита активной мощности за счет применения СНЭ. Заштрихованная область показывает вклад СНЭ в покрытие дефицита активной мощности, а кривая 1 показывает увеличивающийся со временем вклад СНЭ в увеличение мощности [8].

Подключение СНЭ к шинам подстанции с дефицитом мощности позволяет компенсировать нагрузку на магистральные сети [8].

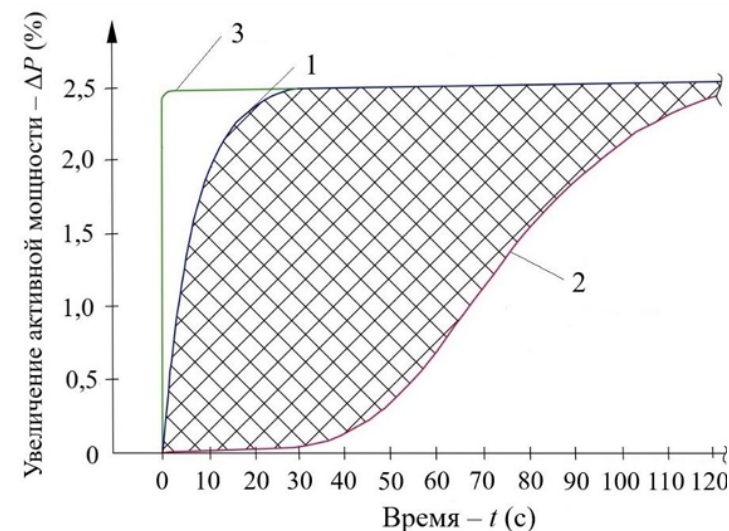


Рисунок 5 – Повышение манёвренности на тепловых станциях

Следует отметить что применение СНЭ без систем виртуальной интеграции (СВИ) интеграции в традиционную энергосистему невозможно на данном этапе развития технологий. СВИ – это комплекс устройств и алгоритмов, выполняющих преобразование постоянного тока в переменный ток промышленной частоты, имитирующий инерционный отклик синхронных машин на возмущение в электроэнергетических системах [9]. СВИ является хорошим вариантом для поддержания баланса между активной и реактивной мощностью при увеличивающейся доли внедрения ВИЭ. И здесь применение ИИ и машинного обучения подходит наилучшим образом.

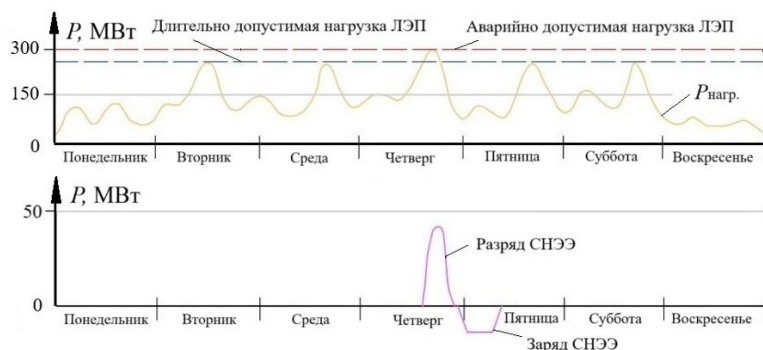


Рисунок 6 – Ликвидация перегрузок магистральных ЛЭП за счет применения СНЭ

Для решения этих проблем необходим комплексный подход с участием основных игроков на рынке энергетической системы, а также анализ международного опыта.

Опыт мирового применения СНЭ

Как показывает опыт зарубежных стран, технологии возобновляемой энергии, включая солнечную и ветровую, будут к 2030 году значительно дешевле ископаемого топлива и атомной энергии что откроет перед странами значительные возможности по снижению стоимости электроэнергии и повышению энергетической безопасности [10].

В качестве основного вида применяемой технологии СНЭ лучше всего подходят литий-ионные аккумуляторы. Литий-ионные аккумуляторы демонстрируют высокую эффективность, длительный срок службы и потенциал для систем накопления энергии в масштабах сети, регулировку частоты, смещение пиковых нагрузок, интеграцию с возобновляемыми источниками энергии и управлением питанием [11].

Также хорошо зарекомендовали себя гибридные системы накопления энергии. Литий-ионные аккумуляторы, суперконденсаторы, конденсаторы и накопители тепловой энергии подходят для поддержки сетей, а гибридные решения предлагают жизнеспособное решение для крупномасштабной интеграции возобновляемых источников энергии. Данный вариант подходит при выработке большого количества энергии ВИЭ [12].

На примере Индии видно, как гибридные системы возобновляемой энергии на основе литий-ионных аккумуляторов обеспечивают оптимальные эксплуатационные расходы для отдаленных сельских регионов, при этом комбинированная стратегия распределения сокращает расходы и снижает

их на 37 % при стратегиях отслеживания нагрузки, циклической зарядки и комбинированной диспетчеризации [13].

Исходя из мирового опыта, стоимость киловатт-часа (кВт·ч) энергии из возобновляемых источников значительно снизилась в последние годы, что делает возобновляемые источники энергии всё более конкурентоспособными по сравнению с ископаемым топливом. Цены на возобновляемую энергию за 1 кВт·ч резко упали при этом стоимость солнечной и ветровой энергии, используемой в коммунальных системах, зачастую ниже 0,05 доллара США за 1 кВт·ч, в то время как для небольших и гибридных систем она может быть выше. Стоимость зависит от технологии, масштаба проекта и местных условий, но возобновляемые источники энергии теперь весьма конкурентоспособны и продолжают становиться всё более доступными [14].

Результаты и обсуждение

ВИЭ должны активно развиваться малым бизнесом совместно со всеми участниками энергосистемы страны. Для этого правительство РК вносит изменения в нормативно-правовую базу и активно стимулирует новые проекты в сфере ВИЭ, что создает привлекательные финансовые условия для установки систем накопителей не только в энергосистеме, но и на стороне потребителей. [15]. Масштабирование данного процесса лишь вопрос времени, который автоматически притянет развитие систем накопления энергии.

Внедрение и интеграция ВИЭ и накопителей энергии сначала в рамках отдельных объектов, далее районов, а затем и области будет только усиливаться. Уже сейчас ведутся расчеты и моделирование работы на совместную работу источников и потребителей энергии в составе автономной энергосистемы с питанием от возобновляемых источников энергии [16]. Для успешного разрешения этого вопроса нужно государственное регулирование и управление, учитывающее интересы всех участников.

Исходя из активного развития ВИЭ можно предположить следующие пути развития накопителей энергии:

1 Создание крупных центров накопителей энергии (КЦНЭ), которые будут хранить энергии при крупных ВИЭ, а также возле крупных производителей энергии. Эти КЦНЭ будут устранять дефицит маневренных мощностей на уровне регионов и областей, с последующим увеличением доли выработки энергии ВИЭ;

2 Создание средних центров накопителей энергии (СЦНЭ), которые будут исполнять роль промежуточных пунктов для регулирования дефицита энергии внутри области, города, промышленного центра;

3 Создание малых центров накопителей энергии (МЦНЭ), которые будут накапливать энергию для собственных нужд (автономное обеспечение энергии), начиная от мелких до средних объектов производств, интегрированных в общую энергетическую сеть региона.

Наиболее реалистичным выглядит 3 вариант развития на начальном этапе внедрения СНЭ, а при увеличении МЦНЭ и выработке излишков энергии постепенное развитие в СЦНЭ, а затем постепенное масштабирование СЦНЭ в КЦНЭ. Также возможен вариант развития накопителей энергии, при котором у конечных потребителей будут реализованы собственные накопители энергии. Тем самым обеспечивая свои нужды по регулированию нормальным и аварийным режимом электропитания, которые в последующем могут быть масштабированы, перейдя в МЦНЭ/СЦНЭ. А затем в последующем перейти на общую диспетчеризацию сначала в рамках районов, области и регионов. Правительство РК активно поддерживает развитие ВИЭ и СНЭ, принимая меры к стимулированию развития данной области, привлекая частный капитал и оказывая субсидирование этого направления.

Выводы

Системы накопления энергии получили новую этап развития с применением литий ионных аккумуляторов, это стало причиной активного промышленного применения СНЭ. В классической трёхэтапной модели «производство, передача с распределением и потребление энергии» появилось новое звено – накопители энергии. Использование СНЭ на каждом этапе отдельно или в составе всей цепи в значительной степени расширило функциональные возможности каждого из этих звеньев и общей цепи. Будущее развитие энергетики в мировом масштабе будет за дешевой, чистой и устойчивой энергией. И это будет невозможно без качественного, надежного и стабильного накопления энергии и Казахстан не может оставаться в стороне от этих тенденций.

При любом развитии событий постоянный рост потребности в электроэнергии будет вынуждать развивать такие направления энергетики страны, как:

- увеличение и модернизация транспортных мощностей по передаче электроэнергии;
- внедрение ВИЭ и СНЭ;
- увеличение манёвренных мощностей, регулирование частоты и повышение стабильности сети.

Управление энергосистемой в будущем будет сочетать элементы как централизованной, так и распределенной методики управления, с целью сочетания преимуществ обоих методик и нивелирования их недостатков.

Выполнен анализ таких источников, как BloombergNEF. Отмечено, что объем ввода ВИЭ будет покрывать 67% мирового потребления электроэнергии к 2050 году [17]. Показано, что рост обусловлен снижением удельной стоимости с 0,1541\$/Квт в 2001 году до 0,0245\$/Квт в 2023 году [18]. В результате сравнения установлено, что в результате применения СНЭЭ можно на 30-50 % сократить установленную мощность солнечных электростанций [19].

Список использованных источников

1 Об утверждении Стратегии достижения углеродной нейтральности Республики Казахстан до 2060 года. Указ Президента Республики Казахстан от 2 февраля 2023 года № 121 [Электронный ресурс]. – Режим доступа: https://unfccc.int/sites/default/files/resource/Carbon_Neutrality_Strategy_Kazakhstan_Ru_Oct2024.pdf (дата обращения: 01.12.2025)

2 Казахстан: баланс между традиционной генерацией и «зелёным» переходом [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://eenergy.media/news/32575> (дата обращения: 30.11.2025)

3 Информация по производству электрической энергии объектами ВИЭ [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://www.gov.kz/memleket/entities/energo/documents/details> (дата обращения: 30.11.2025)

4 **Васильков, О. С.** Повышение энергоэффективности электротехнических комплексов горнообогатительных предприятий с использованием систем накопления электроэнергии: дисс. на соиск. степ. канд. техн. наук – Санкт-Петербург, 2021. – 100 с.

5 В Казахстане построят завод для производства оборудования ВИЭ и систем накопления энергии [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://eenergy.media/news/31398> (дата обращения: 01.12.2025).

6 Energy Storage Investments Boom As Battery Costs Halve in the Next Decade [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://seo.org.pl/en/bnef-do-2030-ceny-baterii-spadna-o-polowe/> (дата обращения: 01.12.2025).

7 A novel peakshaving algorithm for islanded microgrid using battery energy storage system / M. Uddin, M. Romlie, M. Abdullah, C. Tan, G. Shafiullah, and A. H. A. Bakar // Energy – 2020. – vol. 196. – no.117084.

8 Способы эффективного применения систем накопления электроэнергии для повышения гибкости энергосистем [Электронный ресурс]. – Режим доступа: https://www.nts-ees.ru/assets/doc/p/presentation-p133-2025-04-10_ilyushin.pdf (дата обращения: 02.12.2025).

9 Бурмейстер, М. В., Бердышев, И. И., Булатов, Р. В., Насыров, Р. Р. Системы виртуальной инерции: новый подход к интеграции ВИЭ в электроэнергетические системы – М. : «ЭЛЕКТРОЭНЕРГИЯ. Передача и распределение» – 2023. – № 6(81). – 74 с.

10 A comparative analysis of electricity generation costs from renewable, fossil fuel and nuclear sources in G20 countries for the period 2015–2030 / Manish Ram, Michael Child, Arman Aghahosseini, Dmitrii Bogdanov, Alena Lohrmann, Christian Breyer // Journal of Cleaner Production – 2018. – vol. 199. – pp. 687–704

11 Applications of Lithium-Ion Batteries in Grid-Scale Energy Storage Systems / Tianmei Chen, Yi Jin, Hanyu Lv, Antao Yang, Meiyi Liu, Bing Chen, Ying Xie, Qiang Chen // Springer Nature – 2020. – vol. 26. – pp. 208–217

12 A comprehensive review of stationary energy storage devices for large scale renewable energy sources grid integration / Abraham Alem Kebede, Theodoros Kalogiannis, Joeri Van Mierlo, Maitane Berecibar // Renewable and Sustainable Energy Reviews – 2022. – vol 159.

13 Dispatch strategies based performance analysis of a hybrid renewable energy system for a remote rural area in India / Mala Ramesh, Rajeshwer Prasad Saini // Journal of Cleaner Production – 2020. – vol 259.

14 Cost, environmental impact, and resilience of renewable energy under a changing climate: a review / Ahmed I. Osman, Lin Chen, Mingyu Yang, Goodluck Msigwa, Mohamed Farghali, Samer Fawzy, David W. Rooney, Pow-Seng Yap // Environmental Chemistry Letters – 2023. – vol 21. – pp. 741–764

15 Направления развития электроэнергетики Казахстана: ВИЭ [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://eenergy.media/news/20496> (дата обращения: 02.12.2025)

16 Моделирование автономной энергосистемы с накопителем и возобновляемыми источниками энергии / Азаматов, М. Т., Ярославцев, М. В., Талипов, О. М., Спиридонов, Е. А., Испулов, Н. А. // Вестник Торайғыров университета – 2024. – № 1 – С. 22–40.

17 Вероятно, пик выбросов CO₂ в мире пройден в 2024 году – BloombergNEF [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://renen.ru/veroyatno-pik-vybrosov-co2-v-mire-projden-v-2024-godu-bloombergnef/> (дата обращения: 16.01.2026)

18 Wind energy [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://www.irena.org/Energy-Transition/Technology/Wind-energy> (дата обращения: 16.01.2026)

19 Electricity storage and renewables: Costs and markets to 2030 [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://www.irena.org/publications/2017/Oct/Electricity-storage-and-renewables-costs-and-markets> (дата обращения: 16.01.2026)

References

1 Ob utverzhdenii Strategii dostizheniya uglerodnoy neytral'nosti Respubliki Kazakhstan do 2060 goda. Ukaz Prezidenta Respubliki Kazakhstan ot 2 fevralya 2023 goda № 121 [On the Approval of the Strategy for Achieving Carbon Neutrality of the Republic of Kazakhstan by 2060. Decree of the President of the Republic of Kazakhstan No. 121 of February 2, 2023] [Electronic resource]. – Access mode: https://unfccc.int/sites/default/files/resource/Carbon_Neutrlaity_Strategy_Kazakhstan_Ru_Oct2024.pdf (accessed: 12/01/2025)

2 Kazakhstan: balans mezhdru traditsionnoy generatsiyey i «zelonym» perekhodom [Kazakhstan: Balance Between Traditional Generation and the “Green” Transition] [Electronic resource]. – Access mode: <https://eenergy.media/news/32575> (accessed: 11/30/2025).

3 Informatsiya po proizvodstvu elektricheskoy energii ob”yektami VIE [Information on Electricity Generation by Renewable Energy Facilities] [Electronic resource]. – Access mode: <https://www.gov.kz/memleket/entities/energo/documents/details> (accessed: 11/30/2025).

4 Vasil'kov, O. S. Povysheniye energoeffektivnosti elektrotekhnicheskikh kompleksov gornobogatitel'nykh predpriyatiy s ispol'zovaniyem sistem nakopleniya elektroenergii: [Improving the Energy Efficiency of Electrical Engineering Systems of Mining and Processing Enterprises Using Electrical Energy Storage Systems]: PhD (Engineering) dissertation. – Saint Petersburg, 2021. – 100 p.

5 V Kazakhstane postroyat zavod dlya proizvodstva oborudovaniya VIE i sistem nakopleniya energii [A plant for the production of renewable energy equipment and energy storage systems will be built in Kazakhstan]. [Electronic resource]. – Access mode: <https://eenergy.media/news/31398> (accessed: 12/01/2025).

6 Energy Storage Investments Boom As Battery Costs Halve in the Next Decade [Electronic resource]. – Access mode: <http://seo.org.pl/en/bnef-do-2030-ceny-baterii-spadna-o-polowe/> (accessed: 12/01/2025).

7 A novel peakshaving algorithm for islanded microgrid using battery energy storage system / M. Uddin, M. Romlie, M. Abdullah, C. Tan, G. Shafiullah, and A. H. A. Bakar // Energy – 2020. – vol. 196. – no. 117084.

8 Sposoby effektivnogo primeneniya sistem nakopleniya elektroenergii dlya povysheniya gibkosti energosistem [Methods for the Efficient Application of Electrical Energy Storage Systems to Enhance Power System Flexibility]. [Electronic resource]. – Access mode: https://www.nts-ees.ru/assets/doc/p/presentation-p133-2025-04-10_ilyushin.pdf (accessed: 12/02/2025).

9 Burmeyster, M. V., Berdyshev, I. I., Bulatov, R. V., Nasyrov, R. R. Sistemy virtual'noy inertsi: novyy podkhod k integratsii VIE v elektroenerget-

icheskiye sistemy [Virtual Inertia Systems: A New Approach to the Integration of Renewable Energy Sources into Power Systems]. – Moscow: «ELEKTROENERGIYA. Transmission and Distribution», 2023. – No. 6 (81). – 74 p.

10 A comparative analysis of electricity generation costs from renewable, fossil fuel and nuclear sources in G20 countries for the period 2015-2030 / Manish Ram, Michael Child, Arman Aghahosseini, Dmitrii Bogdanov, Alena Lohrmann, Christian Breyer // Journal of Cleaner Production – 2018. – vol. 199. – pp. 687-704

11 Applications of Lithium-Ion Batteries in Grid-Scale Energy Storage Systems / Tianmei Chen, Yi Jin, Hanyu Lv, Antao Yang, Meiyi Liu, Bing Chen, Ying Xie, Qiang Chen // Springer Nature – 2020. – vol. 26. – pp. 208–217

12 A comprehensive review of stationary energy storage devices for large scale renewable energy sources grid integration / Abraham Alem Kebede, Theodoros Kalogiannis, Joeri Van Mierlo, Maitane Berecibar // Renewable and Sustainable Energy Reviews – 2022. – vol 159.

13 Dispatch strategies based performance analysis of a hybrid renewable energy system for a remote rural area in India / Mala Ramesh, Rajeshwer Prasad Saini // Journal of Cleaner Production – 2020. – vol 259.

14 Cost, environmental impact, and resilience of renewable energy under a changing climate: a review / Ahmed I. Osman, Lin Chen, Mingyu Yang, Goodluck Msigwa, Mohamed Farghali, Samer Fawzy, David W. Rooney, Pow-Seng Yap // Environmental Chemistry Letters – 2023. – vol 21. – pp. 741–764

15 Napravleniya razvitiya elektroenergetiki Kazakhstana: VIE [Directions for the Development of the Energy Sector in Kazakhstan: Renewable Energy Sources]. [Electronic resource]. – Access mode: <https://eenergy.media/news/20496> (accessed: 12/02/2025).

16 Modelirovaniye avtonomnoy energosistemy s nakopitelem i vozobnovlyayemyimi istochnikami energii [Modeling of an Autonomous Power System with a Storage System and Renewable Energy Sources] / Azamatov, M. T., Yaroslavtsev, M. V., Talipov, O. M., Spiridonov, Ye. A., Ispulov, N. A. // Vestnik of Toraighyrov University, 2024. – No. 1 – pp. 22–40.

17 Veroyatno, pik vybrosov CO2 v mire proyden v 2024 godu – BloombergNEF [The Global CO₂ Emissions Peak Likely Occurred in 2024]. [Electronic resource]. – Access mode: <https://renen.ru/veroyatno-pik-vybrossov-co2-v-mire-proyden-v-2024-godu-bloombergnef/> (accessed: 01/16/2026)

18 Wind energy [Electronic resource]. – Access mode: <https://www.irena.org/Energy-Transition/Technology/Wind-energy> (accessed: 01/16/2026).

19 Electricity storage and renewables: Costs and markets to 2030 [Electronic resource]. – Access mode: <https://www.irena.org/publications/2017/Oct/Electricity-storage-and-renewables-costs-and-markets> (accessed: 01/16/2026).

Поступило в редакцию 19.01.26.

Поступило с исправлениями 20.02.26.

Принято в печать 27.02.26.

* М. Т. Азаматов¹, М. В. Ярославцев²,
Зия Ур Рехман³, Нияз Мухаммад⁴, А. Б. Ергалиев⁵

^{1,2,5}Торайғыров университет,

Қазақстан Республикасы, Павлодар қ.;

³Университет Куайд-и-Азам,

Пакистан, Исламабад қ.;

⁴Университет Абдул Вали Хана,

Пакистан, Мардан қ.

19.01.26 ж. баспаға түсті.

20.02.26 ж. түзетулерімен түсті.

27.02.26 ж. басып шығаруға қабылданды.

КАЗАҚСТАН РЕСПУБЛИКАСЫНДА ЭНЕРГИЯ САҚТАУ ЖҮЙЕЛЕРІН ҚОЛДАНУДЫҢ АНАЛИТИКАЛЫҚ ШОЛУЫ

Бұл мақалада Қазақстандағы энергетиканы дамытудың ықтималдық моделі ұсынылады, онда энергия сақтау жүйелерін пайдалана отырып, дәстүрлі және жаңартылатын энергия көздерінің бірлескен жұмысы сипатталады.

Энергетика саласындағы қазіргі жағдайға және туындайтын қиындықтарға әсер ететін факторлар, сондай-ақ шешімдер қарастырылады. Әлемдік қауымдастықтың, әсіресе дамыған елдердің тәжірибесіне сүйене отырып, энергия сақтау жүйелері тұрғын үйлерден бастап ірі өнеркәсіптік орталықтарға дейін ұлттық экономиканың барлық салаларында белсенді түрде енгізіліп жатқанын сенімді түрде айтуға болады. Жаңартылатын энергия көздерін белсенді түрде енгізу таза энергия бағдарламасының ажырамас бөлігі ретінде энергия сақтау жүйелерінің дамуына автоматты түрде әкелді.

Энергия тұтыну және өндіру үлгілерін жалпы зерттеу энергия сақтау жүйелерін пайдалану оларсыз жүйелермен салыстырғанда өнімділікті айтарлықтай жақсартқанын көрсетті. Энергия сақтау жүйелерін әртүрлі энергия тұтыну және өндіру вариацияларымен біріктіру жалпы энергетикалық жүйе үшін тиімділік, сенімділік, тұрақтылық және тұрақтылық тұрғысынан жоғары экономикалық

көрсеткіштерді көрсетеді. Энергия сақтау жүйелерінің бастапқы шығындарына қарамастан, энергия сақтау жүйелері ұзақ мерзімді перспективада жалпы энергия жүйесінің шығындарын айтарлықтай төмендетеді. Энергия сақтау жүйелерін пайдалану елдің энергиямен жабдықтау экономикасының дамуы мен жақсаруына оң әсер етеді.

Кілтті сөздер: жаңартылатын энергия көздері, энергия сақтау, тұрақты энергия жүйесі, энергия жүйесінің сенімділігі, энергетиканы дамыту.

*M. T. Azamatov¹, M. V. Yaroslavtsev², Zia-ur-Rehman³,
Niaz Muhammad⁴, A. B. Yergaliyev⁵

^{1,2,5}Toraigyrov University,
Republic of Kazakhstan, Pavlodar;

³Quaid-i-Azam University,
Pakistan, Islamabad;

⁴Abdul Wali Khan University,
Pakistan, Mardan.

Received 19.01.26.

Received in revised form 20.02.26.

Accepted for publication 27.02.26.

ANALYTICAL REVIEW OF THE APPLICATION OF ENERGY STORAGE SYSTEMS IN THE REPUBLIC OF KAZAKHSTAN

This paper proposes a probabilistic model for the development of the energy sector of Kazakhstan, describing the joint operation of conventional and renewable energy sources with the use of energy storage systems.

The factors affecting the current state of the energy sector and the emerging challenges, as well as possible ways to address them, are considered. An analysis of international experience, particularly that of leading countries, allows us to state with confidence that energy storage systems are being actively implemented across all sectors of the national economy, from residential buildings to large industrial centers. The large-scale integration of renewable energy sources has automatically stimulated the development of energy storage systems as an integral part of clean energy programs.

The study of energy consumption and generation modes has shown that the use of energy storage systems significantly improves performance indicators compared to systems operating without them. The combination of energy storage systems with various patterns of energy consumption

and generation demonstrates superior overall economic performance of the power system in terms of efficiency, reliability, resilience, and stability. Despite the initial investment costs associated with energy storage systems, in the long-term perspective they significantly reduce the total costs of the entire power system. The application of energy storage systems has a positive impact on the development and improvement of the national economy in the field of energy supply.

Keywords: renewable energy sources, energy storage system, sustainable energy system, power system reliability, energy sector development.

FTAMP 44.31.31; 87.53.13

<https://doi.org/10.48081/BGQF1936/>**Ж. А. Айдымбаева¹, *Ж. С. Дүйсенбек²****А. С. Бегимбетова³, К. А. Сағытаева⁴, С. Н. Камарова⁵**^{1,2,3,4}Гұмарбек Даукеев атындағы

Алматы энергетика және байланыс университеті,

Қазақстан Республикасы, Алматы қ.

⁵Қарағанды индустриалды университеті,

Қазақстан Республикасы, Теміртау қ.

¹ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-6908-7170>²ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-7844-4240>³ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-8917-2244>⁴ORCID: <https://orcid.org/0009-0009-3588-0144>⁵ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-8464-7204>*e-mail: zhaniko.adina@mail.ru

ҚОРШАҒАН ОРТАҒА ӘСЕРДІ АЗАЙТУ МАҚСАТЫНДА ЖЭО ЖАҢҒЫРТУ НҰСҚАЛАРЫН САЛЫСТЫРМАЛЫ ТАЛДАУ

Мақалада қоршаған орта үшін салдарды азайту қажеттілігіне баса назар аудара отырып, жылу мен электр энергиясын (ЖЭО) біріктіріп өндіру қондырғыларын жетілдірудің әртүрлі әдістемелеріне салыстырмалы талдау ұсынылған. Энергия тиімділігін арттыруға, парниктік газдар шығарындыларын азайтуға және азот пен күкірт оксидтері сияқты зиянды заттарды, сондай-ақ бөлшектерді азайтуға бағытталған заманауи жетістіктер мұқият зерттелуі керек. Жаңартылатын энергия көздеріне көшуді, газ турбиналарын енгізуді, көмірқышқыл газын ұстау жүйелерін құруды және тазарту жабдықтарын жаңғыртуды қоса алғанда, осы технологияларды енгізудің экономикалық орындылығын жан-жақты бағалау жүргізілді. Бұдан басқа, ЖЭО жүйелерін тұрақты қалалық энергиямен жабдықтау жүйелеріне интеграциялаудың энергияға деген өсіп келе жатқан қажеттіліктерін және экологиялық нормаларды сақтау қажеттілігін көрсететін инновациялық стратегиялары қарастырылуда. Экологиялық

қауіпсіздік, экономикалық орындылық және технологиялық сәйкестік тұрғысынан әр баламаның артықшылықтары мен кемшіліктері анықталды.

Қолайсыз атмосфералық әсерлерді азайтуға және ауа мен су ресурстарының сапасын арттыруға бағытталған ұсыныстарды әзірлеуге ерекше назар аударылды. Бұл зерттеудің нәтижелері тез урбанизацияланатын аудандарда экологиялық тұрақты және әлеуметтік жауапты энергиямен жабдықтауды қамтамасыз ету мақсатында Алматының және басқа да ірі қалалық орталықтардың энергетикалық инфрақұрылымын тұрақты дамытуға бағытталған стратегияны әзірлеу үшін негіз бола алады.

Кілтті сөздер: ЖЭО, жаңғырту, шығарындыларды азайту, табиғи газ, азайту, қоршаған орта.

Кіріспе

Қоршаған ортаға әсерді азайту мақсатында ЖЭО жаңғыртудың негізгі стратегиясы жылумен жабдықтаудың қолданыстағы инфрақұрылымын сақтай отырып, жылу және электр энергиясын өндірудің қажетті деңгейін ұстап тұру болып табылады. Негізгі бағыттар жылу қажеттіліктерін жабу үшін белгіленген қуатты пайдалануды арттыру. Электр және жылу энергиясының аралас өндірісін ұлғайту, сондай - ақ экологиялық таза технологияларды енгізу арқылы зиянды заттар шығарындыларын азайту болып табылады.

ЖЭО Алматыны энергиямен жабдықтауда аса маңызды рөл атқарады және объектінің күрделілігі мен тығыз инфрақұрылымына байланысты жаңғыртуды кезең-кезеңімен қарастыру қажет. Атмосфераның ластануын төмендетудің ең тиімді шешімдерінің бірі-станцияның табиғи газға ауысуы.

Газды пайдалану көмір мен мазут күлінің шығарындыларын толығымен дерлік жоюға, күкірт диоксиді, азот және көміртегі оксидтерінің шығарындыларын айтарлықтай азайтуға және парниктік газдардың көлемін азайтуға мүмкіндік береді. Табиғи газға көшу нәтижесінде атмосфераға шығарылатын ластаушы заттардың жалпы саны жылына 80% - ға азаяды.

Энергетикалық қауіпсіздікті зерттеудің негізгі мақсаты энергиямен жабдықтаудың сенімділігі мен тиімділігін төмендетпей, атмосфераға зиянды заттар шығарындыларын азайту үшін ЖЭО жаңғыртудың оңтайлы нұсқасын айқындау, объектінің экологиялық қауіпсіздігін арттыру, Электр және жылу энергиясын өндірудің қазіргі заманғы экологиялық таза технологияларын қолдану, атмосфераға зиянды заттар шығарындыларын азайту есебінен энергия көзінің белгіленген қуатын пайдалануды, энергия

көзін пайдаланудың сенімділігі мен қауіпсіздігін ұлғайту, қолданыстағы жабдықтарды жаңғырту, энергия көзін микропроцессорлық техника негізінде заманауи басқару жүйелерімен жаратқандыру болып табылады.

ЖЭО жаңғыртудың техникалық-экономикалық негіздемесінің негізгі мақсаты энергиямен жабдықтаудың сенімділігі мен тиімділігін төмендетпей, белгіленген қуатты пайдалануды, сенімділікті және пайдалану қауіпсіздігін арттырмай, қоршаған ортаға әсерді азайту үшін ЖЭО жаңғырту нұсқасын іздеу жолымен экологиялық таза технологияларды қолдану есебінен шығарындылардың қоршаған ортаға теріс әсерін азайту болып табылады [1, 29–32–66.].

Материалдар мен әдістері

Бұл зерттеу қоршаған ортаға әсерді азайту тұрғысынан Алматы жылу электр станциясын (ЖЭО) жаңғырту нұсқаларының салыстырмалы талдауын жүргізуге бағытталған, теориялық, есептеу және аналитикалық зерттеу әдістерінің үйлесімін пайдаланады.

Бастапқы деректер және әдіснамалық негіз

Бастапқы деректерге Алматы ЖЭО-ның негізгі және қосалқы жабдықтарының техникалық сипаттамалары, пайдаланылатын отын түрлері, қондырғының жұмыс режимдері туралы ақпарат және базалық кезеңдегі (2023) ластаушы заттар шығарындыларының көлемі мен құрамы туралы деректер кірді.

Нәтижелердің сенімділігін қамтамасыз ету үшін салыстырмалы талдау әдістері, есептеу және аналитикалық тәсілдер, сондай-ақ атмосферадағы ластаушы заттардың таралу процестерін математикалық модельдеу қолданылды [3, 12–6].

ЖЭО жаңғырту сценарийлерінің сипаттамасы

Зерттеуде пайдаланылатын отын түрі мен энергетикалық жабдықтың конфигурациясы бойынша ерекшеленетін ЖЭО жаңғыртудың төрт сценарийі қамтылды (2-кесте):

- 1 және 4 нұсқалар — табиғи газды пайдалану;
- 2 нұсқа — қолданыстағы отынды сақтау (Екібастұз көмірі);
- 3 нұсқа — көмір мен табиғи газды бірге жағу.

Қарастырылып отырған жаңғырту нұсқаларының негізгі сипаттамалары 1-кестеде келтірілген.

1-кесте – ЖЭО Жаңғырту нұсқалары бойынша ластаушы заттардың эмиссиялары, мг/нм³

Көрсеткіштер	Ағымдағы жағдай	ҚР талаптары	ЕО талаптары	ТЭН бойынша ТЭЦ-2 жаңғырту нұсқалары				
				1	2	3	4	5
Отын	көмір	Көмір/газ	Көмір/газ	газ	көмір	көмір	газ	газ
NOx	650	650/125/50*	200/100/50*	100	200	200	50	50
SO2	1500	2000	200	-	200	200	-	-
Күл	400	400	20	-	20	20	-	-

*көмір қазандығы/ газ қазандығы/ газ турбинасы

Осы сценарийлерді таңдау дәстүрлі және аралас жылумен жабдықтау схемаларын қоса алғанда, әртүрлі технологиялық шешімдердің экологиялық тиімділігін салыстырмалы түрде бағалауға, сондай-ақ газ турбиналық қондырғыларды енгізуге мүмкіндік берді.

Ластаушы заттардың дисперсиясын модельдеу

ЖЭО шығарындыларының атмосфераға әсері математикалық модельдеу және Қазақстан Республикасы Қоршаған ортаны қорғау министрлігі бекіткен «Ecolog» бағдарламалық пакеті (3.0 нұсқасы) арқылы бағаланды. Есептеулер Қазақстан Республикасы Қоршаған ортаны қорғау министрінің №100 бұйрығымен бекітілген атмосферадағы ластаушы заттардың дисперсиясын есептеу әдістемесіне сәйкес жүргізілді [4, 6–6].

Зерттеуде тек ЖЭО станциясының түтін шығарындылары қарастырылды, олар зауыттың жалпы шығарындыларының шамамен 99,5%-ын құрайды. Қашқын және қосалқы шығарындылардың көздері есептеуге олардың жалпы ауаның ластануына қосқан үлесінің аздығына байланысты енгізілмеді.

Есептеу сценарийлері және метеорологиялық жағдайлар

Дисперсияны модельдеу ЖЭО-ның екі типтік жұмыс режимі үшін жүргізілді:

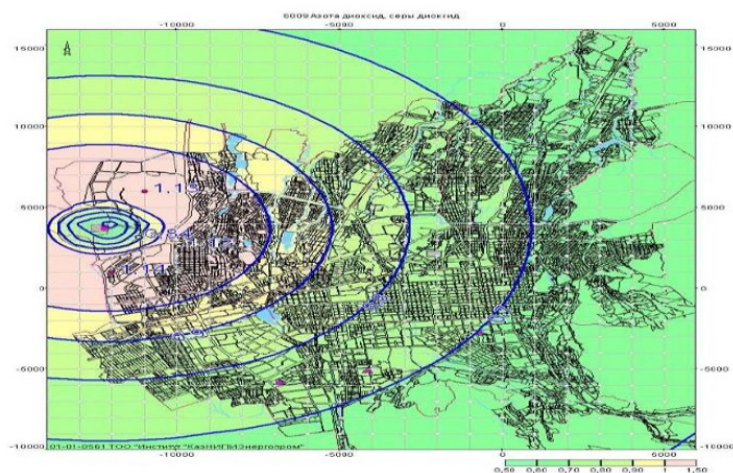
1. Қолайсыз метеорологиялық жағдайлармен біріктірілген зауыттың максималды жүктемесі, атмосфераның жер қабатында ластаушы заттардың жиналуына ықпал етеді. Бұл сценарийде қазандық қуатының 420 т/сағ дейін артуы ескерілді.

2. Зауыттың типтік жұмыс жағдайларын көрсететін орташа жылдық метеорологиялық параметрлер бойынша ЖЭО станциясының орташа жылдық жүктемесі.

Бұл тәсіл бізге шығарындылардың қоршаған ортаға әсерінің максималды және орташа деңгейлерін бағалауға мүмкіндік берді.

Әсер ету аймағын бағалау және өнімділік критерийлері

Есептеу нәтижелеріне сүйене отырып, ЖЭО шығарындыларының әсер ету аймақтарының шекаралары анықталды. Ластаушы заттың түріне байланысты шығарынды түтінінің көзден 15-тен 17 км-ге дейін созылатыны анықталды. Белсенді ластану аймағы шамамен 5 км радиусы бар аумақты қамтиды, онда жер деңгейіндегі ең жоғары концентрациялар тіркеледі және шығарындылардың негізгі бөлігінің 60%-ға дейін түседі. Ластаушы заттардың концентрациясының кеңістіктікте таралуы 1-суретте көрсетілген.



1-сурет – ЖЭО шығарындыларымен белсенді ластану аймағы

Қарастырылып отырған жаңғырту нұсқаларының тиімділігі келесі критерийлер бойынша бағаланды:

- ластаушы заттардың жалпы шығарындылары;
- бастапқы кезеңмен салыстырғанда шығарындылардың азаю дәрежесі;
- есептелген концентрациялардың белгіленген ауа сапасы стандарттарына сәйкестігі;

- отын тиімділігін қоса алғанда, энергия тиімділігі көрсеткіштері.

Оңтайлы нұсқаны таңдау негіздемесі

Есептеу нәтижелері табиғи газға көшу (1 және 4 нұсқалар) күл мен мазут шаңының шығарындыларын толығымен дерлік жоюға, сондай-ақ күкірт диоксиді мен азот оксиді шығарындыларын айтарлықтай азайтуға мүмкіндік беретінін көрсетті. Табиғи газ сценарийлері бойынша ластаушы заттар шығарындыларының жалпы төмендеуі жылына шамамен 80 %-ға жетеді, ал 2023 жылғы деңгеймен салыстырғанда 91,5–93,5 % құрайды [5,96–101-66]. Жаңғырту нұсқаларының экологиялық көрсеткіштерін бағалау үшін пайдаланылатын атмосферадағы негізгі ластаушы заттардың концентрациясының стандартты шектері 2-кестеде келтірілген.

2-Кесте – ЖЭО түтін құбырларынан шығарындылардағы негізгі ластаушы заттардың сипаттамасы

З коды	А Заттың атауы	ШРКм.р., мг/м ³	ШРКс.с., мг/м ³	Қауіптілік классы
0301	Азота(IV) диоксиді (Азота диоксид)	0,2	0,04	3
0304	Азот (II) оксиді (Азота оксид)	0,4	0,06	3
0330	Күкірт диоксиді (Күкіртті ангидрид, Күкіртті газ, Күкірт (IV) оксиді)	0,5	0,05	3
0337	Көміртек оксиді (Көміртек тотығы, Көміртек газ)	5,0	3,0	4
2908	Құрамында кремний қос тотығы бар бейорганикалық тозаң,% -бен: 70-20 (шамот, цемент, цемент өндірісінің тозаңы - саз, көмір күлі)	0,3	0,1	3
4008	қазақстандық кен орындары)	0,30	0,060	
4010	Өлшенген бөлшектер РМ-10	0,16	0,035	

Жаңа ЖЭО ғимаратына газ турбиналық қондырғыларды енгізуді көздейтін 4-нұсқа ең жоғары өнімділікті көрсетті, отын тиімділігі 77–79 % құрады, бұл 1-нұсқадан (шамамен 67 %) айтарлықтай асып түсті.

Модельдеу көрсеткендей, қарастырылып отырған барлық жаңғырту сценарийлері үшін, соның ішінде зауытты газға айналдыру үшін есептелген ластаушы заттардың концентрациясы белгіленген ауа сапасы стандарттарынан аспайды.

Нәтижелер және талқылау

Зерттеу аясында біз ЖЭО-2-дегі ластаушы заттардың атмосфералық таралуын модельдедік, бұл әртүрлі жаңғырту нұсқаларының ауа сапасына әсерін бағалауға мүмкіндік берді. Модельдеу Қазақстан Республикасы Қоршаған ортаны қорғау министрлігі бекіткен «Ecolog» бағдарламалық пакетін (3.0 нұсқасы) пайдалану арқылы жүргізілді [6]. Есептеулер екі сценарий бойынша жүргізілді:

1. Қазандықтың қуатын 420 т/сағ дейін арттыруды ескере отырып, қолайсыз ауа райы жағдайындағы қондырғының максималды жүктемесі;

2. Орташа жылдық қондырғы жүктемесі және орташа жылдық метеорологиялық параметрлер.

Модельдеу нәтижелері барлық жаңғырту нұсқалары ауа сапасының стандарттарына сәйкес келетінін және орташа жылдық жүктеме кезіндегі ластану деңгейі қолданыстағы көрсеткіштерден аспайтынын көрсетті [7].

Жаңғырту нұсқаларын салыстырмалы бағалау. ЖЭО-ның қоршаған ортаға әсерін азайту үшін отын түрі, өндіріс технологиясы және тазалау әдістері бойынша ерекшеленетін төрт жаңғырту нұсқасы қарастырылды:

1-нұсқа. Қазандықтарды табиғи газға көшіру

Бұл нұсқа қазандық агрегаттары мен жанарғыларын, соның ішінде газды тазарту қондырғыларын (ГТҚ) қайта құру арқылы қолданыстағы жабдықты күтіп ұстауды қамтиды. Экологиялық пайдаға 2019 жылмен салыстырғанда шығарындылардың 90%-ға төмендеуі, күл мен күкірт диоксидін толығымен жою кіреді. Негізгі кемшілігі - жерленген қазандық бөлмесіне (-12 м) байланысты пайдалану тәуекелдерінің артуы.

2-нұсқа. Газды тазарту жабдықтарымен көмірмен жаңғырту

Екібастұз көмірі сақталады, бірақ қазандықтар номиналды қуатқа дейін жеткізіледі және заманауи газ тазарту жүйелерімен жабдықталады: NO_x шығарындыларын азайту үшін селективті каталитикалық тотықсыздандыру, SO₂ үшін ылғалды/құрғақ/жартылай құрғақ әдістер және бөлшектерге арналған қапшық сүзгілері/электростатикалық шөгінділер. Қоршаған ортаға тигізетін пайдасы – шығарындылардың 70–80%-ға төмендеуі. Кемшілігі - күлді жою алаңын кеңейту қажеттілігі және топыраққа әсер етудің жалғасуы.

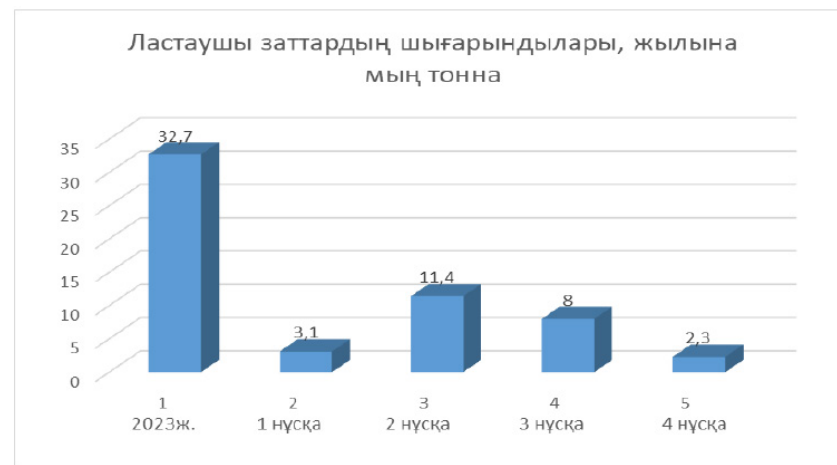
3-нұсқа. Көмір мен газды бірлесіп пайдалану

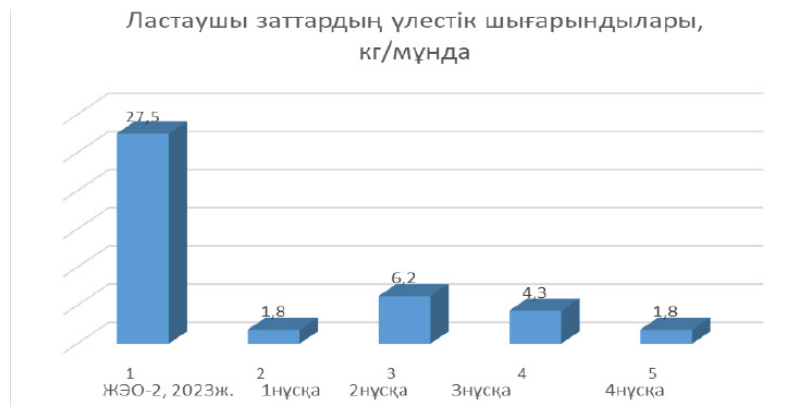
Көмірді жылыту үшін, ал газды ыстық сумен жабдықтау үшін пайдалану. Техникалық шешімдерге жазғы жүктемелер үшін когенерациялық газ турбиналық қондырғыларды (ГТҚ) орнату және қысқы кезеңде көмірмен жұмыс істейтін қазандықтарды газ тазарту жүйелерімен жаңғырту кіреді. Бұл нұсқа электрмен жабдықтаудың сенімділігін және зауыттың икемділігін арттырады.

4-нұсқа. Газ турбиналық технологиясына негізделген жаңа зауыт

Бұл нұсқа көмірмен жұмыс істейтін ЖЭО станциясын толығымен алмастыратын аралас циклді газ турбиналық қондырғылары (ГТҚ) және когенерациялық газ турбиналық қондырғылары (ГТҚ) бар жаңа табиғи газбен жұмыс істейтін қуат көзін салуды қамтиды. Экологиялық пайдаға шығарындылардың максималды 93,5%-ға төмендеуі, шығарындылар ізінің 3,5 км-ге дейін төмендеуі және парниктік газдар шығарындыларының минималды үлесі жатады. Отын тиімділігі 79,3 %-ға жетеді, бұл ең үздік әлемдік тәжірибелер мен қолжетімді технологияларға сәйкес келеді. [8, 9].

Жылдық шығарындылар және ластаушы заттардың құрамы. Нұсқалар бойынша жылдық шығарындылардың салыстырмалы бағасы 2-суретте көрсетілген. Газы бар нұсқалар (1 және 4) күл мен күкірт диоксидін жою және NO_x шығарындыларын азайту есебінен шығарындыларды ең көп азайтуды қамтамасыз етеді. Бұл нұсқалардағы ластаушы заттардың жалпы азаюы 2020 жылмен салыстырғанда 91,5–93,5 % құрайды.





2-сурет – ЖЭО жаңғырту нұсқалары бойынша ластаушы заттардың шығарындылары

Газ турбинасы түрі бойынша шығарындылар (4-нұсқа)

4-нұсқа үшін әртүрлі газ турбиналары үшін шығарындыларды бағалау 3-кестеде көрсетілген. Кішігірім айырмашылықтар ұсынылған барлық газ турбинасы шешімдерінің жоғары тиімділігін көрсетеді.

3-Кесте

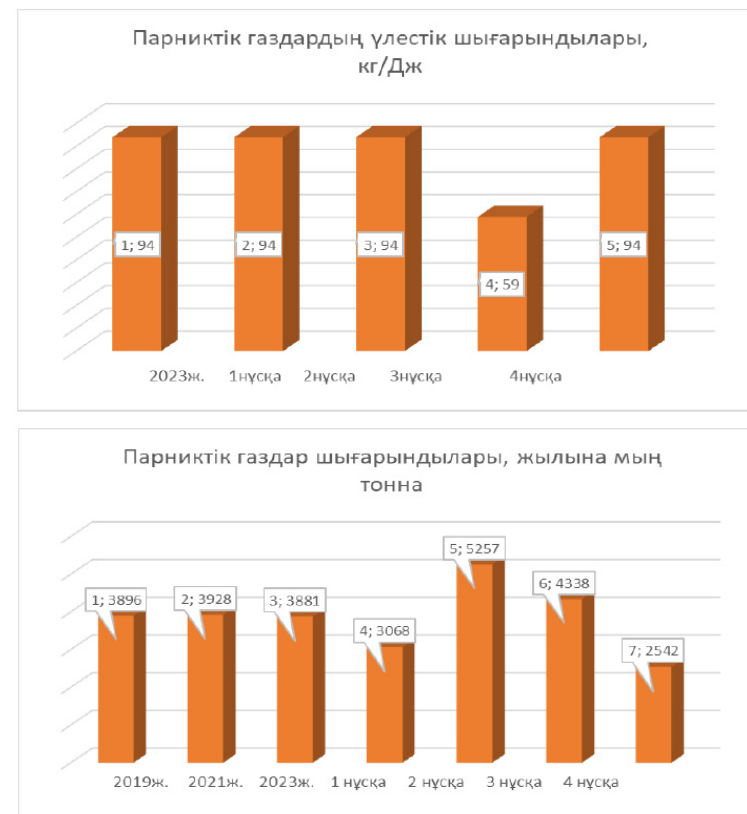
Газ турбиналарының нұсқалары бойынша шығарындылар, мың. т/жыл		
Нұсқа 4.1	Нұсқа 4.2	Нұсқа 4.3
6FA.03GE	SG5T- 2000E Siemens	H-100 MHPs
1,6	2,3	2,4

Парниктік газдар шығарындылары.

Отынды тиімді пайдалану және энергия тиімділігін арттыру CO₂ шығарындыларын азайтып, зауыттың жалпы қоршаған ортаға тигізетін әсерін азайта алады [10, 11].

Біріктірілген жылу және электр энергиясын өндіру (БЭЖ) - қазандық немесе конденсатты электр станцияларымен салыстырғанда CO₂ шығарындыларын минималды түрде қамтамасыз ететін ең жақсы қолжетімді технология. 4-нұсқада өнім бірлігіне шаққандағы минималды меншікті шығарындылар бар (кг/ГДж), бұл сценарийдің жоғары тиімділігін растайды.

ЖЭО жаңғырту нұсқалары бойынша парниктік газдар шығарындыларын бағалау 3 суретте көрсетілген.



3-сурет – Парниктік газдар шығарындыларын бағалау

Қаржыландыру туралы ақпарат.

Бұл мақала “Алматы электр станциялары” АҚ-мен 15.11.19 ж. № 353232/2019/1 (2019-2024жж.) шартына сәйкес әзірленген зерттеулер нәтижелері шеңберінде «АлЭС «АҚ ЖЭО-2 департаменті үшін қоршаған ортаға әсерді барынша азайта отырып, Алматы ЖЭО-2 жаңғырту» техникалық экономикалық негіздемесін әзірлеуге арналған техникалық тапсырмаға сәйкес әзірленді».

Қорытынды

1 Қоршаған орта компоненттеріне және әлеуметтік-экономикалық көрсеткіштерге әсерді кешенді бағалау негізінде ЖЭО жаңғыртудың газбен жұмыс істейтін нұсқалары ең қолайлы болып табылады.

2 Қоршаған ортаға теріс әсерді азайту тұрғысынан ең мүмкін нұсқа - газ турбиналық қондырғылары бар жаңа ғимарат салуды көздейтін 4-нұсқа.

3 4-нұсқаның 1-нұсқадан артықшылықтары:

– ЕО газ жағу талаптарына сәйкес келетін тиімді газ турбиналық қондырғыларды пайдалану;

– 1-нұсқадан (67 %) асып түсетін және ең жақсы қолжетімді технологиялардың талаптарына толық сәйкес келетін (ЕҚТ, 65–95%) отын тиімділігі 77–79 % болатын газ отынын тиімдірек пайдалану;

– Жанып жатқан отын бірлігіне шаққандағы минималды меншікті ластанушы заттар шығарындылары;

– ЖЭО-2-нің қолданыстағы, жерленген ғимаратымен салыстырғанда, жабдықты жаңа ғимаратқа орналастыруға байланысты пайдалану қаупінің төмендеуі

4 Табиғи газдың тұрақты жеткізілімімен 4-нұсқа ресурстарды барынша тиімді пайдалануды және қоршаған ортаға минималды әсерді қамтамасыз етеді.

5 Жаңа ғимарат үшін әртүрлі жеткізушілерден газ турбиналық қондырғыларды таңдау қоршаған ортаның жағдайына аз әсер етеді, себебі барлық қондырғылар еуропалық стандарттар мен ең жақсы қолжетімді технологиялар талаптарына сәйкес келеді.

Ұсыныс: Қаланың энергетикалық жүйесінің тұрақты дамуы және атмосфераға түсетін экологиялық жүктемені азайту үшін 4-нұсқаны жаңа ғимаратта газ турбиналық қондырғыларымен жүзеге асыру тиімдірек, бұл жоғары энергия тиімділігін және экологиялық стандарттарға сәйкестікті қамтамасыз етеді.

Пайдаланылған деректер тізімі

1 ҚР Энергетика министрінің «ең үздік қолжетімді технологиялар тізбесін бекіту туралы» 2014 жылғы 28 қарашадағы №155 бұйрығы. [Мәтін] (11.01.2021 ж. өзгертілген).

2 Экологиялық бағалауды ұйымдастыру және жүргізу жөніндегі Нұсқаулық, Қазақстан Республикасы Экология, Геология және табиғи ресурстар министрінің 2021 жылғы 30 шілдедегі № 280 бұйрығымен бекітілген [Мәтін].

3 Ірі отын жағатын қондырғылар үшін ең жақсы қолжетімді технологиялар (НТ) бойынша анықтамалық құжат. Өнеркәсіптік шығарындылар жөніндегі Директива 2010/75 / ЕУ (ластанудың кешенді алдын алу және бақылау) [Мәтін]. 2010ж.

4 «Салық және бюджетке төленетін басқа да міндетті төлемдер туралы» Қазақстан Республикасының 2017 жылғы 25 желтоқсандағы № 120-VI кодексі (Салық кодексі) [Мәтін], (26.02.2021 ж. жағдай бойынша өзгерістермен және толықтырулармен).

5 Эмиссиялары экологиялық нормалауға жататын ластанушы заттардың тізбесі. Қазақстан Республикасы Экология, Геология және табиғи ресурстар министрінің 2021 жылғы 25 маусымдағы № 212 бұйрығы [Мәтін].

6 Кәсіпорындардың шығарындыларынан атмосфералық ауадағы зиянды заттардың шоғырлануын есептеу әдістемесі (Қазақстан Республикасы Қоршаған орта және су ресурстары министрінің 2014 жылғы 12 маусымдағы № 221 бұйрығына № 12 қосымша).

7 ҚР Экологиялық кодексі, 2007 ж. (02.01.2021 ж. жағдай бойынша өзгертулер мен толықтырулармен), [Мәтін].

8 Marriott, J., Matthews, H.S., Hendrickson, C.T. Impact of Power Generation Mix on Life Cycle Assessment and Carbon Footprint Greenhouse Gas Results. J. Ind. Ecol., [Мәтін]. – 2010, 14, 919–928.

9 Калверт, С. және т.б. "Атмосфераны өнеркәсіптік ластанудан қорғау". - М.: Металлургия [Мәтін]. - Том. 1, 760-бет, том. 2, б. 71, 1988.

10 Рихтер, Л. А., Волков, Э. П., Покровский, В. Н. «Су және ауа бассейндерін жылу электр станцияларының шығарындыларынан қорғау», [Мәтін]. – М., 291, 1981 б.

References

1 Prikaz Ministra Jenergetiki RK “Ob utverzhdenii perechnja nailuchshih dostupnyh tehnologij” ot 28 nojabrja 2014 goda №155. (s izmenenijami ot 11.01.2021 g.) [Order of the Minister of Energy of the Republic of Kazakhstan “On approval of the list of best available technologies” dated November 28, 2014 №155. (as amended on January 11, 2021)] [Tekst]

2 Instrukcii po organizacii i provedeniju jekologicheskoy ocenki, utverzhdena Prikazom Ministra jekologii, geologii i prirodnyh resursov Respubliki Kazahstan ot 30 ijulja 2021, № 280 [Instructions for organizing and conducting an environmental assessment, approved by the Order of the Minister of Ecology, Geology and Natural Resources of the Republic of Kazakhstan dated July 30, 2021 №280.] [Tekst].

3 Spravochnyj dokument po nailuchshim dostupnym tehnologijam (NDT) dlja krupnyh toplivoszhigajushhih ustanovok. Direktiva po promyshlennym vybrosam 2010/75/EU (Kompleksnoe predotvrashhenie i kontrol' zagryaznenija) [Reference document on best available techniques (BAT) for large combustion

plants. Industrial Emissions Directive 2010/75/EU (Integrated Pollution Prevention and Control)] [Tekst]. - 2010.

4 Kodeks Respubliki Kazahstan ot 25 dekabrya 2017 goda №120-VI «O nalogah i drugih objazatel'nyh platezhah v byudzhet (Nalogovyy kodeks)» (s izmenenijami i dopolnenijami po sostojaniju na 26.02.2021). [Code of the Republic of Kazakhstan dated December 25, 2017 №120-VI “On taxes and other mandatory payments to the budget (Tax Code)” (as amended and supplemented as of 02/26/2021).] [Tekst]

5 Perechen' zagryzajushhih veshhestv, jemissii kotoryh podlezhat jekologicheskomu normirovaniju. Prikaz Ministra jekologii, geologii i prirodnyh resursov Respubliki Kazahstan ot 25 ijunya 2021, №121, [List of pollutants whose emissions are subject to environmental regulation. Order of the Minister of Ecology, Geology and Natural Resources of the Republic of Kazakhstan dated June 25, 2021, №121.], [Tekst].

6 Metodika rascheta koncentracij vrednyh veshhestv v atmosfernom vozduhe ot vybrosov predpriyatij (prilozhenie № 12 k prikazu Ministra okruzhajushhej sredy i vodnyh resursov Respubliki Kazahstan ot 12 ijunya 2014 goda №221, [Methodology for calculating concentrations of harmful substances in the atmospheric air from emissions of enterprises (Appendix №12 to the Order of the Minister of Environment and Water Resources of the Republic of Kazakhstan dated June 12, 2014, №221).] [Tekst].

7 Jekologicheskij kodeks RK, 2007 g. (s izmenenijami i dopolnenijami po sostojaniju na 02.01.2021 g.), [Environmental Code of the Republic of Kazakhstan, 2007 (as amended and supplemented as of January 2, 2021)] [Tekst].

8 Marriott, J., Matthews, H.S., Hendrickson, C.T. Impact of Power Generation Mix on Life Cycle Assessment and Carbon Footprint Greenhouse Gas Results. J. Ind. Ecol. [Текст]. – 2010, 14, 919–928.

9 Rihter, L. A., Volkov, Je. P., Pokrovskij, V. N. «Ohrana vodnogo i vozdušnogo bassejnov ot vybrosov teplovyh jelektrostancij» [“Protection of water and air basins from emissions from thermal power plants.”] [Tekst] – М., p. 291, 1981.

10 Kalvert, S. i dr. «Zashhita atmosfery ot promyshlennyh zagryznenij». – М. : Metallurgija– Tom. 1, str. 760, tom. 2, str. 71, 1988. [“Protection of the atmosphere from industrial pollution.”] [Tekst] - М.: Metallurgy, Vol. 1. p. 760. Vol. 2. p. 71, 1988.

04.09.25 ж. баспаға түсті.

05.11.25 ж. түзетулерімен түсті.

02.03.26 ж. басып шығаруға қабылданды.

Ж. А. Айдымбаева¹, *Ж. С. Дүйсенбек²

А. С. Бегимбетова³, К. А. Сағытаева⁴, С. Н. Камарова⁵

^{1,2,3,4}Алматинский университет

энергетики и связи имени Гумарбека Даукеева,

Республика Казахстан, г. Алматы;

⁵Карагандинский индустриальный университет,

Республика Казахстан, г. Темиртау.

Поступило в редакцию 04.09.25.

Поступило с исправлениями 05.11.25.

Принято в печать 02.03.26.

СРАВНИТЕЛЬНЫЙ АНАЛИЗ ВАРИАНТОВ МОДЕРНИЗАЦИИ ТЭЦ С ЦЕЛЬЮ МИНИМИЗАЦИИ ВОЗДЕЙСТВИЯ НА ОКРУЖАЮЩУЮ СРЕДУ

В статье представлен сравнительный анализ различных методологий усовершенствования установок комбинированного производства тепла и электроэнергии (ТЭЦ) с акцентом на необходимость смягчения последствий для окружающей среды. Современные достижения, направленные на повышение энергоэффективности, сокращение выбросов парниковых газов и сокращение вредных веществ, таких как оксиды азота и серы, а также твердых частиц, подлежат тщательному изучению. Была проведена всесторонняя оценка экономической целесообразности внедрения этих технологий, включая переход на возобновляемые источники энергии, внедрение газовых турбин, создание систем улавливания углекислого газа и модернизацию очистного оборудования. Кроме того, рассматриваются новаторские стратегии интеграции систем ТЭЦ в системы устойчивого городского энергоснабжения, отражающие растущие потребности в энергии и необходимость соблюдения экологических норм. Выяснились достоинства и недостатки каждой альтернативы с точки зрения экологической безопасности, экономической целесообразности и технологического соответствия.

Особое внимание уделялось разработке рекомендаций, направленных на смягчение неблагоприятных атмосферных воздействий и повышение качества воздуха и водных ресурсов. Результаты этого исследования могут послужить основой для разработки стратегии, направленной на устойчивое развитие

энергетической инфраструктуры Алматы и других крупных городских центров с целью обеспечения экологически устойчивого и социально ответственного энергоснабжения в быстро урбанизирующихся районах.

Ключевые слова: ТЭЦ, модернизация, снижения выбросов, природный газ, минимизация, окружающая среда.

Zh. A. Aidymbayeva¹, *Zh. S. Duissenbek², A. S. Begimbetova³,

K. A. Sagytayeva⁴, S. N. Kamarova⁵

^{1,2,3,4}Almaty University of Power

Engineering and Telecommunications

named after Gumarbek Daukeev,

Republic of Kazakhstan, Almaty;

5 Karaganda Industrial University,

Republic of Kazakhstan, Temirtau.

Received 04.09.25.

Received in revised form 05.11.25.

Accepted for publication 02.03.26.

COMPARATIVE ANALYSIS OF OPTIONS FOR MODERNIZATION OF THERMAL POWER PLANTS IN ORDER TO MINIMIZE THE IMPACT ON THE ENVIRONMENT

The article presents a comparative analysis of various methodologies for improving combined heat and power generation (CHP) plants, with an emphasis on the need to mitigate environmental impacts. Modern achievements aimed at improving energy efficiency, reducing greenhouse gas emissions and reducing harmful substances such as nitrogen and sulfur oxides, as well as particulate matter, are subject to careful study. A comprehensive assessment of the economic feasibility of implementing these technologies was carried out, including the transition to renewable energy sources, the introduction of gas turbines, the creation of carbon dioxide capture systems and the modernization of treatment equipment. In addition, innovative strategies for integrating CHP systems into sustainable urban energy supply systems are being considered, reflecting the growing energy needs and the need to comply with environmental regulations. The advantages and disadvantages of each alternative in terms of environmental safety, economic feasibility and technological compliance were clarified.

Special attention was paid to the development of recommendations aimed at mitigating adverse atmospheric effects and improving the quality of air and water resources. The results of this study can serve as a basis for developing a strategy aimed at the sustainable development of the energy infrastructure of Almaty and other large urban centers in order to ensure environmentally sustainable and socially responsible energy supply in rapidly urbanizing areas.

Keywords: CHP, modernization, emission reduction, natural gas, minimization, environment.

SRSTI 28.23.20;44.01.81;55.07.07

<https://doi.org/10.48081/BGQF1937>

***K. Akishev¹, A. Podvalov²,
L. Akisheva³, M. Baizharikova⁴, S. Isaev⁵**

¹Kazhach University of Technology and Business
named after K. Kulazhanov,

Department of «Information Technology»,
Republic of Kazakhstan, Astana;

²LLP «AG TECH», Republic of Kazakhstan,
Astana city;

³Nazarbayev Intellectual School,
Republic of Kazakhstan, Astana;

^{4,5}Taraz regional university
named after M. H. Dulati,

Republic of Kazakhstan, Taraz.

¹ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-5202-3501>

²ORCID: <https://orcid.org/0009-0003-3613-0130>

³ORCID: <https://orcid.org/0009-0008-1214-0867>

⁴ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-1591-2697>

⁵ORCID: <https://orcid.org/0009-0008-0988-0952>

*email: akmail04cx@mail.ru

INTELLIGENT CONTROL OF ELECTRIC POWER IN METALLURGY

The research is aimed at solving the strategic task of reducing the energy intensity of a metallurgical enterprise by developing a universal, verifiable hybrid mathematical model. The model integrates energy balance, machine learning, and optimization programming techniques to accurately account for technological, stochastic, and operational factors. Practical testing was carried out on the data of the Aksu ferroalloy plant with a focus on ore-thermal furnaces). The result was a prototype of a digital decision support platform capable of generating operational recommendations to reduce specific energy consumption and identify hidden losses. The purpose of the research is to develop, test and implement a hybrid mathematical model for optimizing and predicting electricity consumption in key ferroalloy production units (ore-thermal furnaces). The

novelty of the proposed approach lies in the integration of the following analytical components into a single structure: energy balance, optimization equations, regression models. The results obtained are intended for use in the following digital enterprise systems: digital energy monitoring systems, Energy Management class systems, Digital counterparts of production processes, Energy efficiency improvement Programs. The model provides an objective basis for the formation of energy saving programs, providing a confirmed reduction in specific electricity consumption by 5%, respectively, reducing the cost of production.

Keywords: mathematical model, energy efficiency, digital platform, program, forecasting, machine learning, metallurgical enterprise.

Introduction

Research on the energy consumption of mining and metallurgical enterprises can be roughly divided into three large groups:

- works analyzing energy consumption at the macro level;
- research on energy efficiency of metallurgical technological processes;
- articles offering mathematical or intellectual approaches to energy efficiency

assessment.

In the presented works, a comprehensive analysis of the energy efficiency of enterprises in Kazakhstan was carried out [1;2;3]. The authors examine panel data, spatial series, and energy consumption statistics, showing that the industrial sector remains the largest consumer of electricity, while the mining and metallurgical industry is one of the most energy-intensive. Methods: regression analysis, spatial models, time series analysis. Main results: key factors of low energy efficiency and regional imbalances have been identified.

These papers describe the analysis and consider the energy system of Kazakhstan as a whole [4;5;6]. Researchers apply optimization models and linear programming methods to analyze the distribution of electricity between network nodes. Methods: linear programming, legislative analysis, system analytics. Main results: systemic limitations of industrial energy supply are highlighted.

A number of papers are devoted to the analysis of specific energy-intensive metallurgy processes. The research analyzes the problems of the mining and metallurgical complex of Kazakhstan, including the high energy intensity of smelting, automation, digitalization, the level of implementation of energy-saving technologies, problematic issues of the industry [7,8,9]. Methods: SWOT analysis, expert analysis, and industry reviews. Results: the strategic problems of the industry have been identified.

Technological processes of arc furnaces, ore processing furnaces, ferrosilicon smelting processes, processing of man-made waste are being examined in the works [10;11]. Methods: thermal balance analysis, experimental melting, thermodynamic modeling.

Results: it is proved that changes in the composition of raw materials and melting parameters significantly affect energy consumption. Analyzing the presented studies, we can conclude that:

– The existing works are valuable, but they are scattered: some analyze the energy system, others analyze individual metallurgical units, and others analyze macroeconomics or intellectual approaches.

There is no mathematical model that would allow quantifying the efficiency of electricity consumption at the level of the entire mining and metallurgical enterprise, taking into account:

– a balanced approach, technological limitations, changes in the composition and properties of raw materials, operating modes of equipment, stochastic factors, and a long-term forecast.

It is this gap that forms the scientific novelty and purpose of this work.

Materials and methods

When developing the model, historical and current data (for 1–2 years) from the Aksu Ferroalloy Plant, obtained from open sources, were used.

Technological: Power, current, electrode voltage, exhaust gas temperature, melting speed, downtime.

Raw materials: Chemical and fractional composition of the charge, fluxes, coke.

Production: Production volume of the finished alloy, chemical composition.

Calculation of the theoretical (reference) specific energy consumption of Eteor based on the stoichiometry of recovery processes.

Machine learning methods have been applied to simulate nonlinear losses and deviations from the reference:

– models: Gradient Boosting Regressor (GBR) or XGBoost to predict the correction factor ΔE (difference between fact and reference) depending on the quality of raw materials;

– assessment of the importance of features (Feature Importance) for identifying key technological levers of energy saving.

Construction of an optimization problem (performed using linear or nonlinear programming):

– minimization of $E(u,d)$ while observing the restrictions;

– calculation of optimal technological parameters for the current composition of raw materials.

Verification: A retrospective comparison of the calculated $E(u,d)$ model with the actual data of the Aksu Ferroalloy Plant.

Results and discussion

Energy intensity is a key characteristic of mining and metallurgical complexes (MMC), where energy costs reach 30–45 % of the cost. Traditional control methods are ineffective due to the inability to take into account the non-linearity of processes, fluctuations in the quality of ore raw materials (for example, chromium ore) and high variability of loads. The aim of the work is to create a mathematical model that provides a quantitative assessment of energy consumption, identification of energy saving reserves and prediction of system behavior.

The production of ferroalloys, especially high-carbon ferrochrome, is carried out in ore-thermal furnaces. Electric power in ore-thermal furnaces is used not only for melting (heating), but also to provide high-temperature chemical reactions for the reduction of oxides (in particular, chromium and iron oxides) from ore.

Fluctuation of the SiO_2 content in the charge is a key factor affecting the viscosity of the slag and the electrical conductivity of the furnace bath. The ML model determines that a 1 % increase in $CSiO_2$ can lead to a 450 kWh/ton increase in E_{ud} . The optimization core recommends adjusting the control variables (u) (for example, increasing P_{set} or changing the composition of fluxes) to compensate for this deviation.

The optimization task is to minimize the specific energy consumption (E_{ud}) for a given volume and quality of products.

Objective function (Formula 1):

$$\min F(u) = \min \frac{\sum_{t=1}^T P_{fact}(u,z) \Delta t}{2a \sum_{t=1}^T M_{pr}(u,z)} \quad (1)$$

Where:

u - is the vector of control variables P_{set} , $V(\text{shikhta})$;

z – vector of uncontrolled factors $CSiO_2$, wear;

$P(\text{fact})$ – actual power;

$M(\text{pr})$ is the mass of the product.

A system of constraints is used for the developed model.

Product Quality: $X_{min} \leq X_{fact}(u,z) \leq X_{max}$;

Furnace power: $P_{min} \leq P_{set} \leq P_{max}$;

Efficiency: $\sum M_{pr} \geq M_{plan}$.

The hybrid mathematical model is represented by the following components:

– physical and technological core (Balance). Models the theoretically required energy (E_{teor}) based on conservation laws and stoichiometry (Formula 2):

$$E(fact) = E(teor) + E(poter) \quad (2)$$

– statistical (ML) component:
– machine learning methods (Gradient Boosting Regressor) were used to predict nonlinear losses ΔP_{ML} caused by stochastic factors (formula 3):

$$\Delta P_{ML}(z) = f_{ML}(C_{Cr/Fe}, C_{CaO}, Z_{узн}, T_{зазоф}, \dots) \quad (3)$$

– integration and optimization:
– hybrid model (Formula 4):

$$P_{fact}(u, z) = P_{teor}(u) + \Delta P_{ML}(z) \quad (4)$$

The optimization core solves the nonlinear programming (NLP) problem of finding u that minimizes Eud .

Figure 1 shows data comparing the modes of the ore furnace (fact, forecast, optimal). The initial data is presented in table 1.

Figure 2 shows a diagram of the importance of the features.

Table 1 – Initial data for calculations

Change	Eud.fact(kvt·h/t)	Eud.forecast (kvt·h/t)	Eud. optimal (kvt·h/t)
1	4050	4020	3850
2	4120	4130	3880
3	3980	3950	3800
4	4250	4260	3950
5	4080	4070	3820
6	4150	4160	3900
7	3950	3940	3800
8	4030	4010	3810
9	4180	4150	3920
19	4010	4000	3800

The graph in Fig.1 shows a comparison of the actual, projected and optimal specific electricity consumption per ton of products over a period of 10 shifts at the Aksu Ferroalloy plant.

Data series:

– fact (Blue): The actual consumption received from the Aksu ferroalloy plant;

– forecast (Yellow): Consumption predicted by the ML model;
– optima (Green): The minimum achievable consumption calculated by the optimizer.

Key information: The vertical gap between the blue (Fact) and green (Option) lines shows the amount of savings reserve.

Verification: The Forecast line (yellow) practically repeats the Fact line (blue), confirming the high accuracy of the ML model.

Savings: The Optima line (green) consistently runs below the actual consumption (Blue line) by about 200–300 kWh/t, which corresponds to an estimated savings potential of 5–7 %.

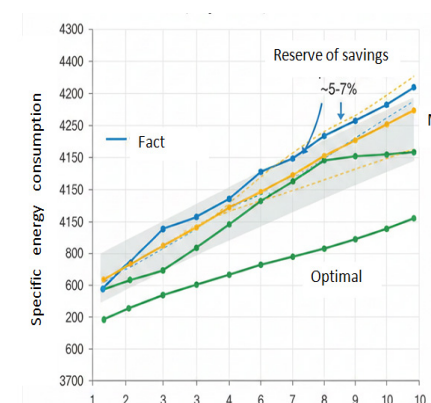


Figure 1– Comparison of ore furnace modes (Fact, Forecast, Optima)

This diagram illustrates the relative importance of various factors influencing the deviation of actual energy consumption from optimal, which allows you to identify key control levers

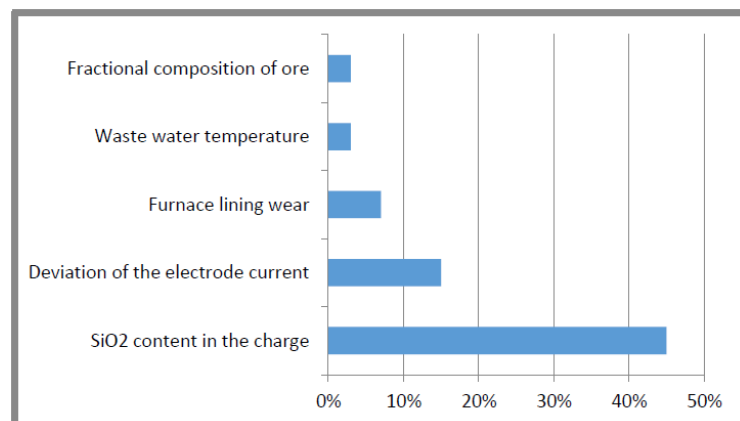


Figure 2 – Diagram of the importance of features

The platform for optimizing energy consumption was developed using the Python language and the PuLP library. A fragment of the program listing is shown in Fig.3.

```
# Importing the optimization librar
from pulp import LpProblem, LpMinimize, LpVariable
# 1. Task definition
prob = LpProblem("Energy_Optimization_AFZ", LpMinimize)
# 2. Defining control variables (u)
Pset = LpVariable("Pset", lowBound=Pmin, upBound=Pmax)
V shihta = LpVariable("Vshihta", lowBound=Vmin,
upBound=Vmax)
# 3. Target function
# Dependence Espec om Pset u V shihta, adjusted ML- a
component
#  $F(u) = (Pset * T + f_{ML}(z)) / Mpr(Pset, V shihta)$ 
prob += (Pset * 1000 + delta_P ML value) / (a * P set + b *
V shihta), "Minimize Specific Energy"
```

Figure 3 – Program listing

Figure 4 shows a block diagram of the architecture and logic of the digital decision support platform of a metallurgical enterprise. Рисунок 3-

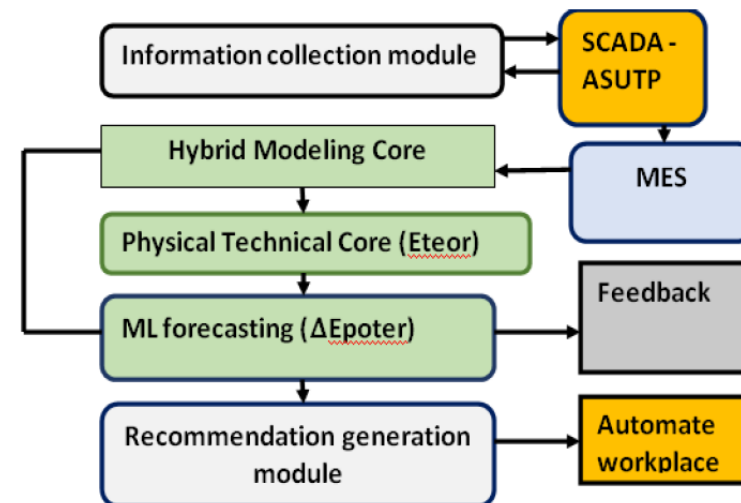


Figure 4 – Block diagram of the architecture and logic of the digital platform

The platform, fig.5, is implemented as a decision support system (DSS) integrating SCADA, MES, and Laboratory data. It includes a Collection Module, a Hybrid Core, and an Operational Recommendation Generation Module.

The active Energy Optimization module is a decision-making center and consists of four main analytical blocks visible on the dashboard:

1. Real-time KPI Monitoring: Displays the current specific energy consumption (3950 kWh/t) and compares it with the optimal target (3680 kWh/t). Includes a consumption forecast schedule for the next 24 hours.

2. Recommendation Center: Issues specific control actions (for example, “Increase P_{set} by 3 MW”) and the predicted savings effect from their implementation (120 kWh per shift).

3. Predictive Analysis (Contributing Factors): The diagram (according to the “Importance of features” type) shows which factors contribute most to the current energy losses (for example, 45% of losses due to the SiO₂ content in the charge).

4. Economic Impact & Reporting: Displays the potential annual savings in monetary terms (1.2 Billion KZT) and the environmental impact (reduction of emissions).



Figure 5 – Energy consumption optimization management platform of a metallurgical enterprise

The functions of energy efficiency monitoring, forecasting, and recommendation generation are presented as a specialized ERP system module accessible through menus and interactive controls.

Conclusions

For the specifics of a metallurgical enterprise (using the example of the Aksu Ferroalloy Plant), a single analytical structure is proposed that combines physical and technological balance, machine learning and optimization programming. This allowed us to move from a purely statistical forecast to management decision-making.

The model quantified fluctuations in the quality of raw materials (key factors: SiO₂, Cr/Fe) with a nonlinear increase in energy consumption.

A prototype digital platform has been developed for integration into the Energy Management (MES/ERP) systems of a metallurgical enterprise, which ensures the transition to proactive energy management.

The model provides an objective basis for the formation of energy saving programs, providing a confirmed reduction in specific electricity consumption by 5 % and, consequently, a reduction in production costs.

Acknowledgement. The research described in the article was conducted within the framework of the initiative project “Digital twin of the product quality management system at all stages of mining and metallurgical production”.

References

- 1 **Petrenko, E et al.** Energy efficiency of Kazakhstan Enterprises unexpected Findings. [Text]. MDPI.Energies, 13(5). – 2024. <https://doi.org/10.3390/en13051055>
- 2 **Velinov, E et al.** «Leaky bucket» of Kazakhstan’s power Grid: Losses inefficient Distribution of electric power [Text]. Energies, 13(11), 2947. – 2020. <https://doi.org/10.3390/en13112947>
- 3 **Smagulova, A., Onlassinova, A., Sayimova, M., Isetova, A.** (2024) The analysis of electricity consumption in Kazakhstan. [Text]. Bulletin of “Turan” University. P.139–154. – 2024. (In Russ.) <https://doi.org/10.46914/1562-2959-2024-1-2-139-154>
- 4 **Assembayeva, M et al.** A spatial electricity market model for the power system: The Kazakhstan case study. [Text]. Energy Volume, 149, P. 762–778. –2018. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2018.02.011>
- 5 **Assembayeva, M et al.** Spatial electricity market data for the power system of Kazakhstan. [Text]. Data in Brief. Volume 23, 103781. – 2019. <https://doi.org/10.1016/j.dib.2019.103781>
- 6 **Karatayev, M et al.** A review of current energy systems and green energy potential in Kazakhstan. [Text]. Renewable and Sustainable Energy Reviews. Volume 55, – P. 491–504. – 2016. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2015.10.078>
- 7 **Karenov, R et al.** The Mining and Metallurgical Industry of Kazakhstan: Current State of Problems, and Strategic Development Priorities. Iejme — mathematics education, Vol. 11, no. 7, P.223–2254. – 2016. <https://www.iejme.com/download/the-mining-and-metallurgical-industry-of-kazakhstan-current-state-of-problems-and-strategic.pdf?>
- 8 **Kunarbekova, M et al.** The State of the Art of the Mining and Metallurgical Industry in Kazakhstan and Future Perspectives: A Systematic Review. [Text]. ES Materials & Manufacturing. P.1–17. – 2024. <https://doi.org/10.30919/esmm1219>
- 9 **Protopopov, A.** Study of silicon production process in ore-smelting furnace and optimization of technological process. [Text]. Complex use of mineral

resources /metallurgy and metallurgical engineering. Vol. 326 no. 3. P.68–80. – 2023. <https://doi.org/10.31643/2023/6445.30>

10 Akylbekov, Y et al. Electrothermal processing of chrysotile-asbestos wastes with production of ferroalloy and extraction of magnesium into the gas phase. [Text]. Complex use of mineral resources. 327, 4, P.74–81. – 2023. <https://doi.org/10.31643/2023/6445.42>

11 Shevko, V et al. Producing a siliceous ferroalloy from a mixture of amorphous rocks. [text]. Results in Engineering. Volume 23, September, 10275.- 2024. <https://doi.org/10.1016/j.rineng.2024.102754>

Received 01.12.25.

Received in revised form 11.02.26.

Accepted for publication 27.02.26.

*К. Акишев¹, А. Подвалов²,

Л. Акишева³, М. Байжарикова⁴, С. Исаев⁵

¹Қ. Құлажанов атындағы

Қазақ технология және бизнес университеті,
Қазақстан Республикасы, Астана қ.;

²«AG TECH» ЖШС,

Қазақстан Республикасы, Астана қ.;

³Назарбаев Зияткерлік Мектебі,
Қазақстан Республикасы, Астана қ.;

^{4,5}М. Дулати атындағы

Тараз өңірлік университеті,
Қазақстан Республикасы, Тараз қ.

01.12.25 ж. баспаға түсті.

11.02.26 ж. түзетулерімен түсті.

27.02.26 ж. басып шығаруға қабылданды.

МЕТАЛЛУРГИЯДАҒЫ ЭЛЕКТР ЭНЕРГИЯСЫН ИНТЕЛЛЕКТУАЛДЫ БАҚЫЛАУ

Зерттеу амбебап, верификацияланатын гибриді математикалық модельді әзірлеу арқылы металлургиялық кәсіпорынның энергия сыйымдылығын төмендетудің стратегиялық міндетін шешуге бағытталған. Модель технологиялық, стохастикалық және операциялық факторларды дәл есепке алу үшін энергетикалық тепе-теңдік, Машиналық оқыту және оңтайландыру бағдарламалау

әдістерін біріктіреді. Практикалық апробация Ақсу ферроқорытпа зауытының деректерінде кенді-термиялық пештерге назар аударатырып жүргізілді). Нәтижесінде электр энергиясының нақты шығынын азайту және жасырын шығындарды анықтау бойынша жедел ұсыныстар жасауға қабілетті цифрлық шешімдерді қолдау платформасының прототипі болды. Зерттеу мақсаты: Ферроқорытпа өндірісінің негізгі агрегаттарында (кенді-термиялық пештер) электр энергиясын тұтынуды оңтайландыру мен болжаудың гибриді математикалық моделін әзірлеу, сынақтан өткізу және енгізу. Ұсынылған тәсілдің жаңалығы келесі аналитикалық компоненттерді бір құрылымға біріктіруден тұрады: энергия балансы, оңтайландыру теңдеулері, регрессиялық модельдер. Алынған нәтижелер кәсіпорынның келесі цифрлық жүйелерінде пайдалануға арналған: цифрлық энергетикалық мониторинг жүйелері, Energy Management класс жүйелері, өндірістік процестердің цифрлық егіздері, энергия тиімділігін арттыру бағдарламалары. Модель энергия үнемдеу бағдарламаларын қалыптастыру үшін объективті базаны ұсынады, электр энергиясының меншікті шығынын тиісінше 5 % - ға төмендетуді, өнімнің өзіндік құнын төмендетуді қамтамасыз етеді.

Кілтті сөздер: математикалық модель, энергия тиімділігі, сандық платформа, бағдарлама, болжау, Машиналық оқыту, металлургиялық кәсіпорын.

*К. Акишев¹, А. Подвалов²,

Л. Акишева³, М. Байжарикова⁴, С. Исаев⁵

¹Казахский университет технологии и бизнеса
имени К. Кулажанова,

Республика Казахстан, г. Астана;

²ОО «AG TECH»,

Республика Казахстан, г. Астана;

³Назарбаев интеллектуальная школа,
Республика Казахстан, г.Астана.

^{4,5}Таразский региональный университет
имени М. Дулати, Республика Казахстан, г.Тараз.

Поступило в редакцию 01.12.25.

Поступило с исправлениями 11.02.26.

Принято в печать 27.02.26.

ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНЫЙ КОНТРОЛЬ ЭЛЕКТРОЭНЕРГИИ В МЕТАЛЛУРГИИ

Исследование направлено на решение стратегической задачи снижения энергоемкости металлургического предприятия путем разработки универсальной, верифицируемой гибридной математической модели. Модель интегрирует методы энергетического баланса, машинного обучения и оптимизационного программирования для точного учета технологических, стохастических и эксплуатационных факторов. Практическая апробация проведена на данных Аксуйского ферросплавного завода с фокусировкой на рудно-термических печах). Результатом стал прототип цифровой платформы поддержки принятия решений, способной генерировать оперативные рекомендации по снижению удельного расхода электроэнергии и выявлению скрытых потерь. Цель исследования: Разработка, апробация и внедрение гибридной математической модели оптимизации и прогнозирования потребления электроэнергии в ключевых агрегатах ферросплавного производства (рудно-термические печи). Новизна предлагаемого подхода заключается в интеграции следующих аналитических компонентов в единую структуру: энергетический баланс, оптимизационные уравнения, регрессионные модели. Полученные результаты предназначены для использования в следующих цифровых системах предприятия: системы цифрового энергетического мониторинга, системы класса Energy Management, Цифровые двойники производственных процессов, Программы повышения энергоэффективности. Модель предоставляет объективную базу для формирования программ энергосбережения, обеспечивая подтвержденное снижение удельного расхода электроэнергии на 5%, соответственно, снижение себестоимости продукции.

Ключевые слова: математическая модель, энергоэффективность, цифровая платформа, программа, прогнозирование, машинное обучение, металлургическое предприятие

МРНТИ 44.41.01

<https://doi.org/10.48081/BGQF1938>

**А. У. Амренова¹, *Е. Е. Салимов²,
У. Б. Абдыбай³, А. М. Жукешов⁴**

^{1,2,3,4}Казахский национальный университет имени аль-Фараби,
Республика Казахстан, г. Алматы.

¹ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-6945-3644>

²ORCID: <https://orcid.org/0009-0005-7712-6263>

³ORCID: <https://orcid.org/0009-0002-5309-5827>

⁴ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-9153-323X>

*e-mail: ernar1996@gmail.com

МЕТАЛ-ВОЗДУШНАЯ БАТАРЕЯ С АНОДАМИ ИЗ ПЕРЕХОДНЫХ МЕТАЛЛОВ И ЕГО ЭФФЕКТИВНОСТЬ

На сегодняшний день развитие новых источников энергии имеет важное значение для удовлетворения растущего спроса на электроэнергию. Метал-воздушные батареи (МВБ), из-за присущей им высокой энергоемкости, являются перспективными топливными элементами для использования в альтернативных энергетических системах. Проблема полноценного внедрения МВБ в эти системы упирается в решение вопроса об эффективной конструкции и деградации электродов. В статье приведены результаты исследования конструктивных особенностей, разрядных характеристик и физико-химических процессов, происходящих в МВБ с алюминиевым и цинковым анодами. Определены ключевые энергетические параметры разработанного прототипа батареи. Кроме того, в работе анализируется механизм эрозии анодов в зависимости от состава электролита и температурных режимов, а также предложены практические пути повышения ресурса и стабильности работы, включая использование пористых и трёхмерных структур, контроль параметров электролита и улучшение теплоотвода. Полученные результаты подтверждают перспективность предложенной конструкции для портативных и резервных применений и обосновывают необходимость дальнейшей оптимизации материалов и методов изготовления для увеличения срока службы и эффективности. В работе подробно описаны

методика изготовления модулей, применённые материалы и приборы для электрофизических измерений, а также методы обработки данных. Представлены рекомендации по масштабированию и внедрению в прикладные проекты с учётом экономических и экологических аспектов, что делает результаты полезными для практических разработчиков и исследователей.

Ключевые слова: энергия, воздушная батарея, алюминий и цинк, ток, мощность.

Введение

Новые, эффективные и экологически безопасные решения в области топливных элементов являются приоритетными на сегодняшний день. Среди электрохимических источников большой интерес вызывают металло-воздушные батареи (МВБ). Принцип действия МВБ основан на возникновении тока в результате окисления металла на аноде и восстановления кислорода на катоде [1]. В научной литературе описано множество типов металловоздушных батарей на основе переходных металлов. В частности, широко изучаются МВБ на основе алюминия и цинка, поскольку эти металлы широко распространены на Земле, недороги и экологически безопасны. Теоретическая плотность энергии алюминиево-воздушных аккумуляторов достигает 8,1 кВт·ч/кг, что позволяет использовать их в портативных устройствах и военной технике. Кроме того, цинково-воздушные батареи широко используются в медицинских приборах (например, слуховых аппаратах) и портативных устройствах [2]. Хотя литий-воздушные батареи обладают более высокой плотностью энергии, проблемы с их безопасностью и нестабильные химические свойства не позволили им выйти за рамки экспериментальной стадии. МВБ на основе магния и железа также стали предметом научных исследований, но их скорость передачи энергии относительно низка. Структура, принципы работы и особенности выбора электролита металловоздушных батарей подробно изучены в литературе [3;4]. Эффективность МВБ зависит от типа материала анода, воздухопроницаемости катода, химического состава электролита и общей конструкции батареи. Такие вопросы, как снижение коррозии анода, обеспечение эффективного восстановления кислорода на катоде и поддержание долгосрочной стабильности электролита, широко обсуждаются в литературе. Все эти факторы напрямую влияют на емкость аккумулятора, срок его службы и цену [5]. Исследования последних лет были направлены на изучение потенциального использования металловоздушных батарей в электромобилях, бытовых системах хранения

энергии и военно-промышленном комплексе. Например, некоторые стартапы предлагают использовать алюминиево-воздушные батареи в качестве резервного источника питания для электромобилей [6]. Цинк-воздушные и железо-воздушные батареи сначала изучались как простые источники энергии. Зарубежными учеными предложены различные методы оценки состояния металловоздушных аккумуляторов в процессе эксплуатации и выявления неисправностей. Например, в работах Д. Линден и Т.Б. Редди подробно описываются электродные процессы и причины деградации металловоздушных батарей [7]. Японские исследователи (К. Ясуда, Т. Ояидзу) предложили электрокомплексные методы диагностики для определения внутреннего сопротивления и зарядной способности аккумулятора [8], а американские авторы (С. Лихт, Р. Чжан) рассмотрели технологии мониторинга в реальном времени разрядных характеристик систем металл-воздух [9]. В последние несколько лет в мире активизировались исследования МВБ с анодами из лития и магния, а также по применению МВБ в электромобилях [10;11;12;13;14;15]. Рассматриваются также варианты электрически заряжаемых МВБ на основе пористых электродов [16]. В целом можно отметить, что разработка МВБ в мире идет ускоренными темпами. В отечественных источниках пока отсутствуют сведения об исследованиях металло-воздушных аккумуляторов. Но разработку таких батарей для нужд сельского хозяйства, транспорта и военных целей необходимо проводить уже сегодня. Целью данной работы является создание лабораторного прототипа металловоздушной батареи и исследование особенностей работы и возможности получения стабильной выходной мощности путем использования алюминия и цинка в качестве анода, учитывая, что это доступные в РК металлы.

Методика и материалы

Первоначальная задача создать простую и эффективную конструкцию, состоящую из одной ячейки, и экспериментально измерить ее разрядные характеристики. Разработанная конструкция воздушной батареи проста и удобна для проверки основного принципа работы и контроля характеристик разряда. Принцип работы прототипа основан на реакции окисления металла на аноде и наличии кислорода воздуха в качестве окислителя. На рисунке 1 показано устройство электрохимической ячейки - модуля с одним анодом и двумя катодами. Далее на рис. 2 показано фото разработанной авторами батареи МВБ, которая состоит из 3-слойного модуля, состоящего из 2 секций и 6 ячеек. В каждом модуле использовалась алюминиевая/цинковая пластина размером 4x8x0,4 см. В качестве катода использовался проводящая воздух пластина из углеродного волокна, покрытая гидрофобным слоем

изнутри (воздушный катод). Этот слой позволяет кислороду поглощаться из внешней среды и участвовать в электрохимических реакциях. В качестве электролита использовался щелочной раствор (например, NaOH). Электролит обеспечивает реакцию окисления алюминия на аноде и создает среду для свободного движения ионов. Верхний изолятор батареи изготовлен из пластины фторопласта с вырезами для установки и фиксации анодов. Материал корпуса: полимерный каркас, винты и токопроводящие провода (медные и алюминиевые провода).

Внутренние модули батареи соединены последовательно друг с другом, по 3 ячейки, каждая из которых имеет напряжение около 1,4 В. Суммарное напряжение составляет 8,4 В (рис.2). Пары анод-катод в каждом модуле расположены близко друг к другу и электрически соединены медными проводами. Этот прототип батареи эффективен для лабораторных целей и может послужить основой для крупномасштабных разработок в будущем. Модульная структура позволяет проводить испытания в различных конфигурациях и увеличивать производительность.

Электротехнические измерения проводили с применением цифрового мультиметра Fluke 8655. Оптические снимки поверхности сделаны с использованием цифровой камеры в режиме макрофокуса, и с использованием микроскопа AM Score 580 T.

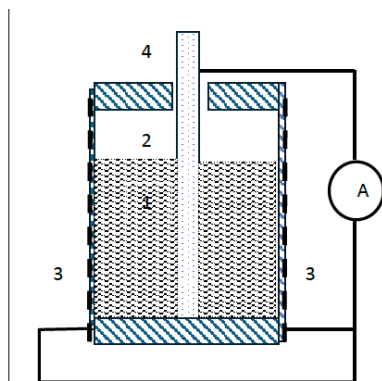


Рис.1 Схема ячейки МАБ. 1- электролит, 2 – ячейка, 3 – катоды, 4 –анод.



Рис.2 Лабораторный прототип батареи МАБ

Результаты исследований и обсуждение

В ходе экспериментального исследования контролировались электротехнические характеристики МАБ и изменения в материалах электродов на основе цинка и алюминия. Все эксперименты проводились при плотности 4 Моль/л. Процесс разряда цинково-воздушной батареи проводился в течение 60 минут, данные представлены на рис.3. С течением времени измерялись ток короткого замыкания (I), напряжение открытой ячейки (U) и масса материала анода (m). В течение первых 10 секунд сила тока составляла 2,4–2,2 А, затем она понизилась до 1,4 А. Через несколько минут сила тока достигла 0,6 А и далее стабилизировалась на уровне 0,57–0,63 А, аккумулятор работал стабильно. Напряжение оставалось практически постоянным, варьируясь от 1,40 до 1,47 В. Масса анода составила 23 г на 0 мин, 22 г на 15 мин, 21 г на 35 мин и 20 г на 60 мин. Таким образом, за 60 минут была зафиксирована потеря массы 3 г, что составляет 13%. Эти показатели показывают, что аккумулятор может работать в стабильном режиме длительное время, но цинковый анод постоянно окисляется. Цинк-воздушная батарея изначально запускается с высоким током, затем постепенно стабилизируется и может работать при постоянном напряжении и токе в течение длительного времени. Масса анода уменьшается равномерно, что свидетельствует о стабильности процесса окисления цинка.

В эксперименте, проведенном с батареей на основе алюминия, показания тока и напряжения были значительно выше, чем у цинковой батареи: Первоначальный ток был 1,44 А, затем увеличился до 2,0 А. Напряжение варьировалось в пределах 1,43–1,50 В в течение 60 минут. Хотя алюминиевый анод обеспечивал высокие значения тока, потеря массы происходила медленнее, чем у цинкового. Масса алюминиевого анода уменьшалась на 18 мг каждые 20 мин, что составляет потерю 54 мг за 1 час. Столь малое значение потери массы объясняется различием механизма окисления и кинетики реакции алюминия. Как видно из рис.2, ток со временем постепенно увеличивается от 1,4 А до 2,1 А. Это связано с удалением окисного слоя на поверхности. Результат свидетельствует о высокой реакционной активности алюминиевого электрода в процессе разряда. Напряжение существенно не меняется и находится в пределах 1,43–1,47 В. Воздушно-алюминиевая батарея способна обеспечивать постоянное напряжение и нарастающий ток в течение определенного периода времени. Это указывает на его пригодность для применений, требующих кратковременного сильного тока. В ходе электрохимической реакции наблюдалось уменьшение массы анода (алюминия): примерно на 17–18 мг. Изменение тока колеблется сильнее, чем напряжение, что указывает на то, что химические реакции внутри

батареи со временем замедляются. Напряжение остается примерно на постоянном уровне, что указывает на то, что батарея работает эффективно после начального периода.

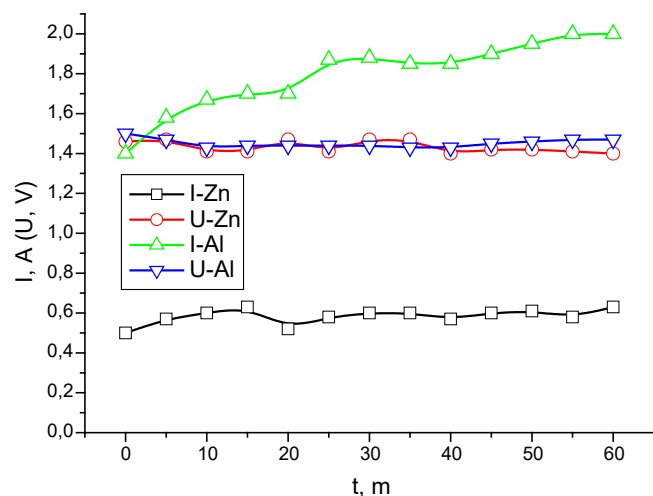


Рисунок 3 – Электротехнические характеристики ячейки МАБ с анодом из цинка и алюминия.

(по ординате: I – ток к.з., U – напряжение х.х.)

Основываясь на данных теста, рассчитаем емкость алюминиевой батареи из последовательно соединенных ячеек по средним значениям тока и напряжения в ячейке. Формула расчета мощности (Вт·ч):

$$P = kUIt$$

где: U – среднее напряжение (В), I – ток (А), t – время (часы), k – количество ячеек = 6. Для рассча берем U=1,5 В, I=1,8 А, t=1 час получим $2,7 \times 6 = 16,2$ Вт·ч. Для цинковой батареи U=1,4 В, I=0,6 А, t=1 час получим $0,84 \times 6 = 5,0$ Вт·ч.

Емкость МАБ, так как это топливный элемент, измеряется в Втч/кг. Максимальную емкость нашего прототипа батареи можно оценить, зная теоретическую плотность энергии металл-воздушных аккумуляторов - 8,1 кВт·ч/кг для алюминия и 1,4 кВт·ч/кг для цинка. Масса одного алюминиевого анода 36 г, масса алюминия в батарее 216 г. Тогда $C = 8,1 \times 0,216 = 1,74$ кВт·ч.

Масса одного цинкового анода 23 г, масса цинка в батарее 138 г. Тогда $C = 1,4 \times 0,138 = 0,19$ кВт·ч. Так как МАБ это почти идеальный источник тока, при стандартных 9 В его емкость в стандартных величинах составит 190 Ач для алюминия и 20 Ач для цинка. Отсюда очевидно, что в сравнении с обычными щелочными АКБ теоретическая емкость МАБ на порядок выше.

Интересно также оценить время работы МАБ. Например для алюминия потеря массы анода за один час составила $m = 54$ мг, а полная потеря массы алюминия в батарее $6 \times 0,054 = 0,324$ г. Тогда ресурс батареи составит $T = (216 \text{ г} / 0,324 \text{ г}) \times 1 \text{ ч} = 667$ ч. Потеря массы анода за один час составила $m = 3$ г, а полная потеря массы цинка в батарее $6 \times 3 = 18$ г. Тогда ресурс батареи составит $T = (138 \text{ г} / 3 \text{ г}) \times 1 \text{ ч} = 7,67$ ч. Следует напомнить, что МАБ это не АКБ, а топливный элемент, поэтому МАБ батареи работают до физической замены электродов. В ходе исследования металловоздушные батареи (МАБ) подключались к различным нагрузочным сопротивлениям (R) и измерялись их значения тока (I) и напряжения (U). данные приведены в таблице 1.

Таблица 1 – Нагрузочные данные МАБ с двумя типами анодов

№	R (Ом)	I (А) Zn	U (В) Zn	R (Ом) Al	I (А) Al
1	0,076	1,56	1,42	0,07	1,86
2	0,75	0,79	1,38	1,5	0,550
3	1,5	0,5	1,48	3,0	0,335
4	6,8	0,16	1,38	6,8	0,166
5	68	0,0019	1,42	68	0,02

Проанализируем данные в табл.1. На цинковом аноде: При низком сопротивлении ($R = 0,076$ Ом) ток достигает 1,56 А. По мере увеличения сопротивления ток значительно уменьшается ($R = 68$ Ом, $I = 0,0019$ А). На алюминиевом аноде: при $R = 0,07$ Ом ток достигает 1,86 А. При $R = 68$ Ом ток составляет около 0,02 А. Батарея с алюминиевым анодом способна выдавать большой ток при низком сопротивлении, но цинковый также показывает аналогичный результат. Это указывает на то, что внутреннее сопротивление обоих типов анодов низкое. Напряжение на цинковом аноде варьировалось от 1,38 до 1,42 В. Таким образом, наблюдаемые ВАХ метал-воздушных батарей с любым электродом соответствуют источнику тока. Наконец, рассмотрим эрозию анодов в процессе эксплуатации и влияние электролита.

На рисунке 4 показано состояние поверхности анода из алюминия после тестирования в среде электролит а плотностью 1, 4 и 6 Моль/л.



Рис.4. Состояние анода из Алюминия при разной концентрации. Слева направо 1-4-6 Моль/л, 60 мин.

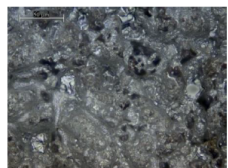


Рис.5 Черные оксидные включения на поверхности алюминиевого анода

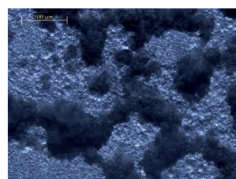


Рисунок 6 – Следы вытравливания на поверхности цинкового анода.

Как видно из фотографии на рис. 4, на поверхности алюминиевых анодов образуется нарост из дендритов. Причем, рост идет преимущественно в части анода ближе к уровню кипения электролита. Данное поведение характеризует активность действия окислительных реакций при кипении электролита, так как температура достигала до 100 С при концентрации 6 М/л. В то же время, при низкой концентрации электролита температура опускалась до 80 С при 4 М/л и до 40 С при 1 М/л. Судить о восстановительных реакциях мы не можем без определения уровня водорода в ячейке. Однако количество водорода можно оценить теоретически путем расчета этой реакции, такие данные приведены в литературе. Утилизация водорода в разработанной ячейке происходит через отверстие на крышке около анода. Таким образом, для предотвращения роста дендритов необходимо не превышать плотность электролита и принимать меры по контролю его температуры. Хорошим методом для решения этой проблемы является прокачка электролита через ячейку, однако для мобильных устройств это решение неэффективное. При более детальном исследовании поверхностей анодов с оптическим увеличением до 10X, обнаружены следующие эффекты. Так, на алюминиевой пластине идет травление с формированием кристаллов оксида в виде

черных включений (рис.5.) размерами порядка 10 мкм. Со временем их количество увеличивается, однако они неустойчивы и легко смываются тем же электролитом. Таким образом при прокачке электролита с достаточной скоростью, этот эффект можно нивелировать. На цинковом электроде, процесс травления происходит иначе. На рис.6 видно присутствие глубоких ям с резкими границами глубиной до 200 мкм и длиной до нескольких мм. Такой характер травления приводит к тому, что цинковый электрод быстро разрушается как бы изнутри. Поэтому необходимо принимать меры к увеличению жесткости конструкции анода, например, используя 3Д структуры материала – металлические пены и другие конструкции.

Информация о финансировании

Работа выполнена в рамках проекта гранатового финансирования Комитета науки МНВО РК BR21882187.

Выводы

Итак в результате исследований разработан и испытан образец МАБ со следующими техническими характеристиками:

- Материал анода: алюминиевая /цинковая пластина (чистота 99%)
- Материал катода: воздухопроницаемая поверхность, покрытая слоем углерода

Электролит: щелочной раствор (NaOH), pH ≈ 4

– Время работы: до 660 часов при постоянном напряжении 9 В

– Ток: 0,6–2 А с одной ячейки,

– Мощность 2–16 Вт·ч.

Основными преимуществами прототипа являются его модульная структура, изготовление из простых материалов и пригодность для массовой сборки. Это устройство показало, что оно может быть эффективно при исследовании альтернативных источников энергии и питания небольших устройств в будущем. Общая эффективность и особенности применения: Цинковый анод экологически безопасен, имеет высокую плотность энергии и хорошую стабильность напряжения. Но при этом он легко охрупчивается в результате травления в электролите. Алюминиевый анод характеризуется низким внутренним сопротивлением и может обеспечивать высокий ток, однако на его поверхности может образовываться пассивный слой, что может вызвать проблемы при длительном использовании. В то время как цинковый анод отличается постоянным напряжением и энергоэффективностью, алюминиевый анод выделяется своей способностью отдавать длительно мощность. Каждый металл следует выбирать с учетом его конкретной области применения: например, алюминий может быть эффективен для

устройств, требующих высокой мощности, а цинк — там, где требуется стабильное напряжение.

Список использованных источников

- 1 **Ахметов, А. Қ., Қабақова, Т. А.** Электротехниканың теориялық негіздері: техникалық жоғары оқу орындарының студенттеріне арналған оқулық. – Астана, 2004. – 511 с.
- 2 **Көкенова, Г. Т., Кубаева, У. С.** Электр тізбектерінің теориясы: ЖОО студенттеріне арналған оқулық. – Алматы: ҚР ЖОО қауымдастығы, 2013. – 296 с.
- 3 **Tarascon, J. M., Armand, M.** Issues and challenges facing rechargeable lithium batteries // *Nature*. – 2001. – Vol. 414. – p. 359–367.
- 4 **Christensen, J., Albertus, P., Sanchez-Carrera, R.S. et al.** A critical review of Li/air batteries // *J. Electrochem. Soc.* – 2012. – Vol. 159(2). – p. 12–30.
- 5 **Zhang, J.** Advanced Electrocatalysts for Low-Temperature Fuel Cells. – New York: Wiley, 2019. – 456 p.
- 6 **Xu, K.** Nonaqueous liquid electrolytes for lithium-based rechargeable batteries // *Chem. Rev.* – 2004. – Vol. 104(10). – p. 403–418.
- 7 **Linden, D., Reddy, T. B.** Handbook of Batteries. – 4th ed. – McGraw-Hill, 2011. – 317 p.
- 8 **Yasuda, K., Oyaizu, T.** Evaluation of internal resistance in air-metal batteries // *J. Power Sources*. – 2015. – Vol. 274. – p. 103–110.
- 9 **Licht, S., Zhang, R.** Development of aluminum-air and other metal-air batteries // *J. Appl. Electrochem.* – 2013. – Vol. 43(11). – p. 108–109.
- 10 **Liu, W., Placke, T., Chau, K.T.** Overview of batteries and battery management for electric vehicles // *Energy Rep.* – 2022. – Vol. 8. – p. 4058–4084. <https://doi.org/10.1016/j.egyr.2022.03.016>.
- 11 **Sun, Q., Dai, L., Luo, T., Wang, L., Liang, F., Liu, S.** Recent advances in solid-state metal–air batteries // *Carbon Energy*. – 2022. – p. 1–23. <https://doi.org/10.1002/cey2.276>.
- 12 **Wang, Y., Sun, Y., Ren, W., Zhang, D., Yang, Y., Yang, J., Wang, J., Zeng, X., NuLi, Y.** Challenges and prospects of Mg-air batteries: a review // *Energy Mater.* – 2022b. – Vol. 2. – 200024. <https://doi.org/10.20517/energymater.2022.20>.
- 13 **Wang, L., Snihirova, D., Deng, M., Vaghefinazari, B., Xu, W., Höche, D., Lamaka, S.V., Zheludkevich, M.L.** Sustainable aqueous metal-air batteries: an insight into electrolyte system // *Energy Storage Mater.* – 2022. – Vol. 52. – p. 573–597. <https://doi.org/10.1016/j.ensm.2022.08.032>.

- 14 **Li, J., Zhang, K., Wang, B., Peng, H.** Light-Assisted Metal–Air Batteries: Progress, Challenges, and Perspectives // *Angew. Chem. Int. Ed.* – 2022. – Vol. 61. <https://doi.org/10.1002/anie.202213026>.
- 15 **Liu, Y., Lu, X., Lai, F., Liu, T., Shearing, P.R., Parkin, I.P., He, G., Brett, D.J.L.** Rechargeable aqueous Zn-based energy storage devices // *Joule*. – 2021. – Vol. 5. – p. 2845–2903. <https://doi.org/10.1016/j.joule.2021.10.011>.
- 16 **Parker, J.F., Chervin, Ch.N., Nelson, E.S., Rolison, D.R., Long, J.W.** Wiring zinc in three dimensions re-writes battery performance — dendrite-free cycling // *Energy & Environmental Science*. – 2014. – Vol. 7. – p. 1–14.

References

- 1 **Ahmetov, A. Q., Qabakhova, T. A.** Elektrotehnikanın teorialyq negizderi: texnikalyq joǵary oqy oryndarynyń studentterine arnalgʻan oqulyq [Theoretical foundations of electrical engineering: textbook for technical university students]. – Astana, 2004. – 511 p.
- 2 **Kökenova, G. T., Kubaeva, U. S.** Elektr tizbekteriniń teoriiasy: Joǵary oqu oryndarynyń studentterine arnalgʻan oqulyq [Theory of electric circuits: textbook for university students]. – Almaty: Qazaqstan Respublikasy Joǵary Oqu Oryndary Qauymdastyǵy, 2013. – 296 p.
- 3 **Tarascon, J. M., Armand, M.** Issues and challenges facing rechargeable lithium batteries // *Nature*. – 2001. – Vol. 414. – p. 359–367.
- 4 **Christensen, J., Albertus, P., Sanchez-Carrera, R.S. et al.** A critical review of Li/air batteries // *J. Electrochem. Soc.* – 2012. – Vol. 159(2). – p. 12–30.
- 5 **Zhang, J.** Advanced Electrocatalysts for Low-Temperature Fuel Cells. – New York: Wiley, 2019. – 456 p.
- 6 **Xu, K.** Nonaqueous liquid electrolytes for lithium-based rechargeable batteries // *Chem. Rev.* – 2004. – Vol. 104(10). – p. 403–418.
- 7 **Linden, D., Reddy, T. B.** Handbook of Batteries. – 4th ed. – McGraw-Hill, 2011. – 317 p.
- 8 **Yasuda, K., Oyaizu, T.** Evaluation of internal resistance in air-metal batteries // *J. Power Sources*. – 2015. – Vol. 274. – p. 103–110.
- 9 **Licht, S., Zhang, R.** Development of aluminum-air and other metal-air batteries // *J. Appl. Electrochem.* – 2013. – Vol. 43(11). – p. 108–109.
- 10 **Liu, W., Placke, T., Chau, K.T.** Overview of batteries and battery management for electric vehicles // *Energy Rep.* – 2022. – Vol. 8. – p. 4058–4084. <https://doi.org/10.1016/j.egyr.2022.03.016>.

11 Sun, Q., Dai, L., Luo, T., Wang, L., Liang, F., Liu, S. Recent advances in solid-state metal–air batteries // Carbon Energy. – 2022. – p. 1–23. <https://doi.org/10.1002/cey2.276>.

12 Wang, Y., Sun, Y., Ren, W., Zhang, D., Yang, Y., Yang, J., Wang, J., Zeng, X., NuLi, Y. Challenges and prospects of Mg-air batteries: a review // Energy Mater. – 2022b. – Vol. 2. – 200024. <https://doi.org/10.20517/energymater.2022.20>.

13 Wang, L., Snihrova, D., Deng, M., Vaghefinazari, B., Xu, W., Höche, D., Lamaka, S. V., Zheludkevich, M. L. Sustainable aqueous metal-air batteries: an insight into electrolyte system // Energy Storage Mater. – 2022. – Vol. 52. – p. 573–597. <https://doi.org/10.1016/j.ensm.2022.08.032>.

14 Li, J., Zhang, K., Wang, B., Peng, H. Light-Assisted Metal–Air Batteries: Progress, Challenges, and Perspectives // Angew. Chem. Int. Ed. – 2022. – Vol. 61. <https://doi.org/10.1002/anie.202213026>.

15 Liu, Y., Lu, X., Lai, F., Liu, T., Shearing, P. R., Parkin, I. P., He, G., Brett, D.J.L. Rechargeable aqueous Zn-based energy storage devices // Joule. – 2021. – Vol. 5. – p. 2845–2903. <https://doi.org/10.1016/j.joule.2021.10.011>.

16 Parker, J. F., Chervin, Ch. N., Nelson, E. S., Rolison, D. R., Long, J. W. Wiring zinc in three dimensions re-writes battery performance — dendrite-free cycling // Energy & Environmental Science. – 2014. – Vol. 7. – p. 1–14.

Поступило в редакцию 21.07.25.

Поступило с исправлениями 06.11.25.

Принято в печать 03.03.26.

А. У. Амренова¹, *Е. Е. Салимов²,

У. Б. Әбдібай³, Ә. М. Жүкешов⁴

^{1,2,3,4}Әл-Фараби атындағы Қазақ ұлттық университеті,

Қазақстан Республикасы, Алматы қ.

21.07.25 ж. баспаға түсті.

06.11.25 ж. түзетулерімен түсті.

03.03.26 ж. басып шығаруға қабылданды.

ӨТКІШ МЕТАЛДЫҚ АНОДТАРЫ БАР МЕТАЛДЫҚ-АУА БАТАРЕЯСЫ ЖӘНЕ ОНЫҢ ТИІМДІЛІГІ

Энергияның жаңа көздерін дамыту электр энергиясына сұраныстың өсуін қанағаттандыру үшін маңызды. Металл-әуе батареялары (МAB) өздерінің жоғары энергия тығыздығына байланысты балама энергетикалық жүйелерде қолдануға

перспективалы қуат элементтері болып табылады. МAB-тарды толық енгізудің негізгі мәселесі — тиімді конструкцияны әзірлеу және электродтардың деградациясын шешу. Бұл мақалада алюминий және мырыш анодтары бар МAB-тардың конструктивтік ерекшеліктері, разрядтық сипаттамалары және физика-химиялық процестері жөніндегі зерттеулердің нәтижелері берілген. Жасалған батареяның негізгі энергетикалық параметрлері анықталды. Сонымен қатар жұмыс электролит құрамы мен температуралық режимдерге байланысты анодтардың эрозия механизмін талдайды және қызмет мерзімін және жұмыс тұрақтылығын арттыруға практикалық шешімдер ұсынады, соның ішінде пористі және үшөлшемді анодтық конструкцияларды қолдану, электролит параметрлерін бақылау және жылууды алып кетуді жақсарту. Алынған нәтижелер ұсынылған конструкцияның портативті және резервтік қолданбалар үшін перспективалы екенін растайды және қызмет мерзімі мен тиімділікті ұзарту мақсатында материалдар мен өндіру әдістерін әрі қарай оңтайландыру қажеттігін негіздейді. Мақалада модульдерді дайындау әдістері, электрофизикалық өлшеулерге арналған қолданылған материалдар мен аспаптар, сондай-ақ деректерді өңдеу әдістері егжей-тегжейлі сипатталған. Жүйені масштабтау және қолданбалы жобаларға енгізу жөніндегі ұсыныстар экономикалық және экологиялық аспектілер ескеріліп берілген, бұл нәтижелерді практикалық әзірлеушілер мен зерттеушілер үшін құнды етеді.

Кілтті сөздер: энергия, ауа батареясы, алюминий және мырыш, ток, қуат

А. У. Амренова¹, *Ye. Ye. Salimov²,

U. B. Abdybay³, A. M. Zhukeshov⁴

^{1,2,3,4}Al-Farabi Kazakh National University,

Republic of Kazakhstan, Almaty.

Received 21.07.25.

Received in revised form 06.11.25.

Accepted for publication 03.03.26.

METAL-AIR BATTERY WITH TRANSITION METAL ANODES AND ITS EFFICIENCY

The development of new energy sources is of critical importance to meet the growing demand for electricity. Metal–air batteries (MAB), owing

to their inherently high energy density, represent promising power elements for application in alternative energy systems. Full-scale implementation of MABs in such systems depends on resolving issues of efficient design and electrode degradation. This paper presents the results of a study of design features, discharge characteristics and physicochemical processes occurring in MABs with aluminum and zinc anodes. Key energy parameters of the developed battery prototype are determined. In addition, the work analyzes the mechanism of anode erosion as a function of electrolyte composition and temperature regimes, and proposes practical approaches to extend lifetime and operational stability, including use of porous and three-dimensional anode structures, control of electrolyte parameters and improvement of heat removal. The results confirm the promise of the proposed design for portable and backup applications and substantiate the need for further optimization of materials and manufacturing methods to increase service life and efficiency. The paper provides a detailed description of module fabrication methods, the materials and instruments used for electro-physical measurements, and data processing techniques. Recommendations for scaling and integration into applied projects are presented with consideration of economic and environmental aspects, making the findings useful for practitioners and researchers.

Key words: energy, air battery, aluminum and zinc, current, power.

FTAMP 44.31.01

<https://doi.org/10.48081/BGQF1939>

***М. А. Ануарбеков¹, А. К. Мерғалимова²,
М. А. Маханова³, С. Б. Ыбрай⁴, М. Б. Айтмағамбетова⁵**

^{1,2,3,4,5}«С. Сейфуллин атындағы

Қазақ агротехникалық зерттеу университеті»,
Қазақстан Республикасы, Астана қ.

¹ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-9483-7105>

²ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-5990-8182>

³ORCID: <https://orcid.org/0009-0006-7090-869X>

⁴ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-5262-2149>

⁵ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-7443-9708>

*email: anuarbekov1495@mail.ru

СИНТЕТИКАЛЫҚ ГАЗДАРҒА АРНАЛҒАН ЖАНАРҒЫ ТҰРАҚТАНДЫРҒЫШЫНЫҢ АЭРОДИНАМИКАСЫН САНДЫҚ МОДЕЛЬДЕУ

Синтетикалық газ – бұл үнемі өзгеріп отыратын құрамы бар реактивті емес отын, оны тиімді жағу үшін тұрақтандырғыштың оңтайлы бұрышын таңдауды қажет етеді. Бұрыштық тұрақтандырғыштардың үш нұсқасы қарастырылды: 45°, 60° бұрыштары бар, сонымен қатар жартылай шеңбер тәрізді тұрақтандырғыш. Бұлардың геометриялық шамалары және тұрақтандырғыштан кейінгі тиімді аэродинамикалық өнімділіктерін Ansys Fluent бағдарламасымен сандық модельдеу бойынша есептеулер жүргізілді. Сандық модельдеудің есептеу нәтижелері болашақта тәжірибе жасау кезінде қолданылады.

Басты мақсат - физикалық үлгілерді жасап шығару мен отын мен ауаның аралас қоспасының нәтижелі жануын қамтамасыз ететін тұрақтандырғыштың оңтайлы бұрышын табу мақсатында жанарғыдағы ауа (не болмаса биогаз) аэродинамикалық ауа ағынына (немесе синтетикалық газға) сандық талдау жүргізу болды.

Сандық модельдеу нәтижелері тұрақтандырғыштардың геометриясы мен көлбеу бұрышы жылдамдықтың таралуына және ағынның аэродинамикалық сипаттамаларына айтарлықтай

әсер ететіндігін көрсетті. Рециркуляция аймағындағы тұрақтандырғыштардың ішкі бөліктеріне ерекше көңіл бөлінеді. Ағындардың жылдамдықтарының ауытқуынан таралатын тізбектерге ықпалы аса маңызды болмаса да, тұрақтандырғыштардың құрылымы мен еңісі отын мен ауаның араласу үдерістеріне, жалынның орнықты болуына, толық жанбау деңгейіне және азот тотығының бөліну мөлшеріне елеулі ықпал ететіні айқындалды.

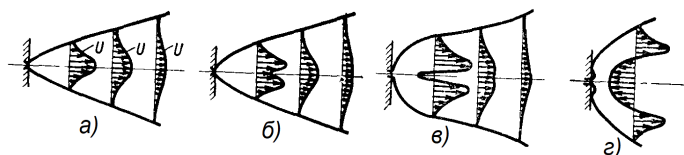
Кілтті сөздер: бұрыштық тұрақтандырғыш, шиыршық ағын, аэродинамикалық қима, жылдамдықтар сұлбасы, рециркуляция аймағы.

Кіріспе

Қазіргі заманда альтернативті энергияның көздеріне деген сұраныс артып келеді. Синтетикалық газ – отынның құрамы әрдайым өзгеріп тұрады және төменгі реактивті болып табылады. Синтетикалық газдың құрамындағы метанның мөлшері, табиғи газбен салыстырғанда аз.

Осыған байланысты, құрамы өзгеріп отыратын және реактивтілігі төмен синтетикалық газды жағуға арналған тиімді әмбебап жанарғы құрылғысын жобалау керек. Қолданыстағы жану жүйелерін талдау көрсеткендей, ең қолайлы нұсқа - әр түрлі құйындылармен және жану өнімдерін қайта өңдеумен микрофакельді жағу технологиясын қолдану. Мұндай құрылғылар айқын айналым әсерлерінсіз тұрақты жануды қамтамасыз етеді. Синтетикалық газдың реактивтілігі төмен болғандықтан рециркуляция аймағына мейлінше газдардың көп болуы, биогаздың тез тұтануы мен тұрақты жағуына мүмкіндік береді.

Айналым ағындарда қозғалыс жылдамдығы үш негізгі бағытта байқалады: тангенциалды, ось бойымен және радиалды бағытта. Бұл бағыттарда жылдамдық шамалары айналым құрылғы аймағында шамамен тең дәрежеде байқалады (сурет 1).



а – аз бұралған ағындар, б – орташа бұралу ағындар, в – қатты бұралған және жабық пішінді ағындар, г – қатты бұралған және ашық пішінді ағындар.

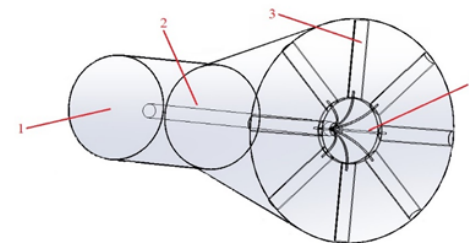
1-сурет – Әртүрлі бұралу деңгейлеріндегі реактивті ағындардың жылдамдық профильдері.

Аздап айналған ағындарда ось бойындағы жылдамдық, әдетте, ағын осінің бойымен ең жоғары мәнге ие болады. Алайда, айналу күшейген сайын осьтегі бойлық жылдамдықтың шамасы азайып, жылдамдықтың таралу бейіні М әрпіне ұқсайтын пішінге ие болады. Ағын ось бойымен тұрақты түрде айналу барысында рециркуляция аймағы пайда болады. Ағын көлемі одан әрі ұлғаятын болса рециркуляция аймағында құйынды ядро қалыптасады. Кейбір зерттеу мәліметтерінде [1, 240-6; 2, 1192–1206-бб.] құйынды көлемінің өзгеріске ұшырауынан рециркуляция аймағы қалыптасады. Бұл өз уақытында шығарындылар дәрежесін бәсеңдете отырып, жалын тұрақтылығын ұлғайтуға өз әсерін береді [3, 709–714-бб.], сонымен қатар жылу көзі мен химиялық белсенді радикалдарды қамтамасыз етті [4, 50-6.].

Жану камерасына келіп түсетін ауаның айналу жылдамдығын арттыру – алдын ала араластырылмайтын жану жағдайында отын мен ауаның тиімді араласуын қамтамасыз етудің бір тәсілі болып есептеледі [5, 352–364-бб.; 6, 303–312-бб.]. Рециркуляция аймағына отын мен ауаны алдын-ала араластырмай беру, отын мен ауаның араласу мүмкіндігі артып, жылу алмасу, жалын температурасы таралуы мен зиянды шығарындылардың мөлшеріне әсер етеді [7, 2517–2526-бб.]. Зерттеулерде [8, 32–39-бб.] жанарғыға кіретін ауаның айналым қозғалысының ұлғаюы газ отынын жағатын жанарғылардың тиімділігіне әсер етеді. Айналу артуымен азот оксиді (NOx) эмиссияларының қоршаған ортаға таралу көлемін бәсеңдету мен жанарғыдан шығатын газдар температурасын бәсеңдетуге жақсы ықпал етеді.

Материалдар мен әдістері

Сурет 2-де жанарғы құрылғысының жалпы көрінісі көрсетілген. Оның жұмыс принципі келесідей: ауа жанарғы құрылғысына сурет 2-де көрсетілгендей енеді. Отын оттық түтігі арқылы жалпы коллекторға жеткізіледі, ол жерден әр тұрақтандырғышқа бөлек бөлінеді. Жану процесі кезінде тұрақтандырғышпен жасалған рециркуляция аймағында отын мен ауа араласады.

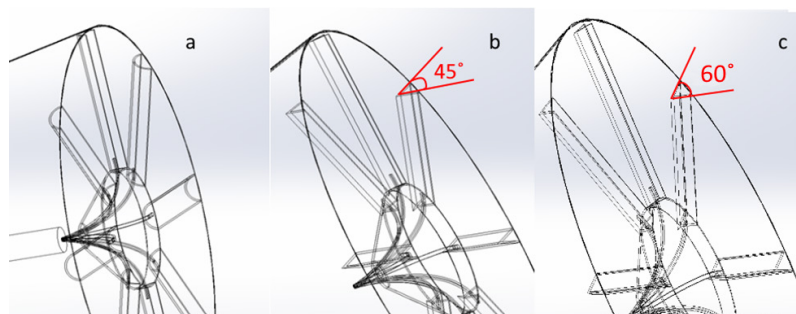


1 – ауа кіретін бөлік, 2 – отын түсетін коллектор, 3 – тұрақтандырғыштар, 4 – әрбір тұрақтандырғышқа отын берілетін түтіктер

2-сурет – Жанарғы құрылғысы

Сурет 3-те үш түрлі тұрақтандырғыштар бейнеленген. Теориялық зерттеу жұмыстарында жартылай дөңгелек пішінді тұрақтандырғыш пен 45° , 60° бұрыштары болатын бұрыштық тұрақтандырғыштар қарастырылды. Бұл геометриялық параметрлерді таңдау олардың жануға төзімділігіне байланысты, бұл тәжірибелік зерттеулермен расталды.

Қазіргі уақытта 3 (а) суретте көрсетілген жартылай дөңгелек пішінді тұрақтандырғыштар жақсы зерттелмеген. Мұндай микрофакельді құрылғылар өте жаңа және жану тиімділігін арттыру тұрғысынан айтарлықтай ғылыми қызығушылық тудырады.



а – жартылай дөңгелек пішінді, б – 45° бұрышпен, с – 60° бұрышпен.

Сурет 3 – Бұрыштық тұрақтандырғыштар

Ansys Fluent бағдарламасымен сандық модельдеу барысында пропан-бутан қоспасынан өндірілген синтетикалық газ есептелінді. Синтетикалық газдың құрамы кесте 1-де келтірілген.

Кесте 1 – Синтетикалық газ

№	Синтетикалық газ	
	C3H8, %	C4H10, %
1	55	45

Математикалық модель мен шекаралық шарттар

Жану процесін жану құрылғысындағы модельдеу үшін есептеулер импульс, масса және энергияның сақталу заңдарына негізделіп жүргізілді. Бұл міндеттерді іске асыру бойынша есептеулерде келесідей әдістер қолданылады:

Импульс бойынша сақталу заңы:

$$\frac{d(\rho\omega_i)}{dt} + \frac{d}{dx_j}(\rho\omega_{ij}) = -\frac{dP}{dx_i} + \frac{d\tau_{ij}}{dx_j} + \rho g_i + F_i \quad (1)$$

мұндағы – ω_{ij}, i, j бағыттары бойынша қозғалыс жылдамдығы;

τ_{ij} – кернеуге қатысты шаманың коэффициенті;

P – қысым мөлшері;

ρg_i – ауырлық күшінің әсері;

F_i – сыртқы ортамен әрекеттесу нәтижесінде туындайтын әсер күштері

[9].

Масса бойынша сақталу заңы:

$$\frac{d\rho}{dt} + \frac{d}{dx_i}(\rho\omega_i) = 0 \quad (2)$$

мұндағы ρ – отын мен ауаның аралас қоспасының тығыздығы;

$\omega_i - x_i$ осьтері бойындағы қозғалыс жылдамдығының құрамдас бөлігі.

Энергия сақталудың заңы:

$$\frac{d(\rho h)}{dt} = -\frac{d}{dx_i}(\rho u_i h) - \frac{dq_i}{dx_j} + \frac{dP}{dt} + u_i \frac{dP}{dx_i} + \tau_{ij} \frac{du_j}{dx_i} + S_h \quad (3)$$

Ansys Fluent бағдарламасымен сандық модельдеу барысында турбулентті ағындар бойынша k-ε стандартымен есептеулер жүргізілді [10, 191-б; 11, 1393–1398.-бб.]. k-ε стандарты бойынша k турбуленттік ағындардың кинетикалық энергиясы мен ε диссипациялық жылдамдығының теңдеулері қарастырылады.

Стандартты k-ε турбуленттік моделі [12, 123498-б; 13, 108927-б; 14, 101740-б.] көздерінде көрсетілген.

Түрбелентті кинетикалық энергияның тасымалдану теңдеуі:

$$\frac{d(\rho k)}{dt} = \frac{d}{dx_j}(\rho u_j k) + \frac{d}{dx_j} \left[\frac{\mu_{eff}}{\sigma_k} \cdot \frac{dk}{dx_j} \right] + P - \rho \varepsilon \quad (4)$$

Кинетикалық энергияның диссипациясының теңдеуі ε:

$$\frac{d(\rho \varepsilon)}{dt} = -\frac{d}{dx_j}(\rho u_j \varepsilon) + \frac{d}{dx_j} \left[\frac{\mu_{eff}}{\sigma_\varepsilon} \cdot \frac{d\varepsilon}{dx_j} \right] + C_{\varepsilon 1} \frac{\varepsilon}{k} P - C_{\varepsilon 2} \frac{\varepsilon^2}{k} \rho \quad (5)$$

мұндағы $\sigma_k, \sigma_\varepsilon$ – Прандтльдің турбулентті сандары.

Турбулентті энергияның диссипация жылдамдығы:

$$\rho \epsilon = \mu_{\text{turb}} \left(\frac{du'_j}{dx_j} + \frac{du'_j}{dx_i} \right) \quad (6)$$

Турбуленттіліктің кинетикалық энергиясын өндіру:

$$P = \left[\mu_{\text{turb}} \left(\frac{du_j}{dx_j} + \frac{du_j}{dx_i} \right) - \frac{2}{3} \rho k \delta_{ij} \right] \frac{du_j}{dx_j} \quad (7)$$

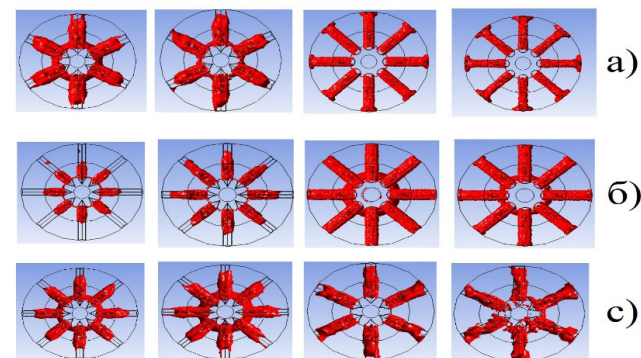
Жанарғы құрылғының есептік аймағының шекаралары қатты қабырғаларды және басқа бөліктерді қабылдайды. Кіру және шығу бөлімдері басқа бөліктер болып табылады. Бастапқы шекарылық шарт ретінде: $u=0$, $P=0$, $w=0$, $C=0$, $v=0$, $T=0$, $k=0$, $\epsilon=0$ қабылданады. Шекаралық шарттар кесте 2-де берілген.

2-кесте – Шекаралық шарттары

№	Параметр	Мәні
Массаға қатысты шекаралық шарттар		
1	Қабырғалардағы температура	300 К
2	Енгізілетін ауаның массасының ағыны	3,2-4,3 кг/сағ
3	Артық ауаның коэффициенті, α	2-5
Температура бойынша шекаралық шарттар		
1	Қабырғалардағы температура	300 К
2	Енгізу бөлігіндегі температура	300 К

Нәтижелер және талқылау

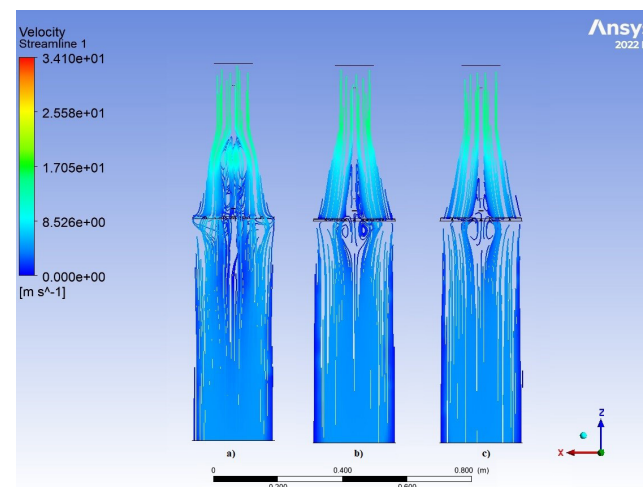
Сурет 4-те тұрақтандырғыштардан кейінгі құйынды ағындар аймағында көрсетілген үш түрлі тұрақтандырғыштың түрі берілген. Көрсетілгендей, жартылай дөңгелек пішінді тұрақтандырғыштарда құйындардың түзілуінің жоғары қарқындылығы байқалады, ал 45° бұрышпен орналасқан тұрақтандырғыштарда бұл көрсеткіштер едәуір төмен. Суреттен көріп тұрғандай, жылдамдық артқан сайын құйынды аймақтар ұлғаяды. Мұндай жағдайда, жартылай доға тәрізді тұрақтандырушы элементтер пайдаланылғанда, жоғары жылдамдық кезінде құйын аймақтары қабырғаға жақын орналасқан аймаққа дейін жетіп, араласу процесінің қалыптасуына қосымша ықпалын тигізеді.



а – жартылай дөңгелек пішінді, б – 45° бұрышпен, с – 60° бұрышпен.

Сурет 4 – Тұрақтандырғыштардан кейінгі айналмалы ағындар

Сурет 5-те әртүрлі түрдегі тұрақтандырғыштар үшін отын-ауа қоспасының ағын профилі көрсетілген. Ең тиімді ағын жартылай дөңгелек пішінді тұрақтандырғыштар қолданылған кезде байқалады. Бұрышты тұрақтандырғыштар да ұқсас сипаттамалар көрсетеді, алайда ағыс күрделілігі олардың бұрыштары арасындағы бұрышқа байланысты болады.



а – жартылай дөңгелек пішінді, б – 45° бұрышпен, с – 60° бұрышпен.

5-сурет – Отын-ауа қоспасының ағын профилі
Қаржыландыру туралы ақпарат

Бұл зерттеу Қазақстан Республикасы Ғылым және жоғары білім министрлігінің ғылыми жобаларды гранттық қаржыландыруын іске асыру аясында жарияланып отыр, AP19675062 «Ұшатын жанғыш заттарды өндіру үшін таза көмір технологиясын әзірлеу».

Қорытынды

Сандық модельдеудің нәтижелері бойынша анализдері көрсеткендей бұрыштық тұрақтандырғыштың өлшемдері мен аэродинамикалық сипаттамалары, сондай-ақ, бұрыштық жылдамдығының өрісіне нақты бір деңгейде өз әсерін береді. Жылдамдық контурының ауқымына жылдамдық шамаларын ауыстыру аса қатты әсер етпейді, дегенмен бұрыштық тұрақтандырғыштардың геометриялық құрылымы және де бұрыштық жану жүйелерінің тұрақтылығына, синтетикалық газдардың түгелімен жанып кетуіне сонымен қатар, азот оксиді шығарындыларының мөшеріне ықпал ететін отын мен ауа қоспаларының араласуының жүйелеріне өз әсерін береді. Жанарғының шыға берісіне орнатылатын бұрыштық тұрақтандырғыштардың ішкі құрылымдарына ерекше қарау керек. Жартылай дөңгелек пішінді бұрыштық тұрақтандырғыштарда рециркуляция аумағында отын мен ауаның араласуы жақсы байқалады. Отын мен ауаның жақсы араласуынан төмен реактивті синтетикалық газдың тұтануы тез әрі синтетикалық газдың тұрақты жануы орын алды. Сандық модельдеу барысында синтетикалық газды тұтандыруда бай қоспада – тұрақты ауа жылдамдығында, газ мөлшері ең көп берілгенге дейін, ал кедей қоспада – тұрақты ауа жылдамдығында, газ мөлшері ең аз берілгенге дейін есептеулер жүргізіліп, анықталды. Осы есептеулердің негізінде жанудың тұрақтылығын арттыру үшін оңтайлы жылдамдық таңдалып, кейін ол тәжірибелік зерттеулерде қолданылады.

Пайдаланылған деректер тізімі

- 1 **Ахмедов, Р. Б.** Аэродинамика закрученной струи [Текст]. / Р.Б. Ахмедов, Т.Б., Балагуда, Ф.К., Рашидов [и др.]; под ред. Р.Б. Ахмедова. -М.: Энергия, 1977. – 240 с.
- 2 **Leibovich, S.** Vortex stability and breakdown- Survey and extension AIAA J. – 1984. – Vol. 22, No. 9, P. 1192–1206.
- 3 **Coghe, A., Solero, G., Scribano, G.** Recirculation phenomena in a natural gas swirl combustor Exp. Therm. Fluid Sci. – 2004. – Vol. 28, No. 7, P. 709–714.
- 4 **Сударев, А. В., Маев, В. А.** Газотурбинные камеры сгорания с закрученным движением воздушных потоков. – М., 1968. – 50 с.

5 **Tong, Y., Liu, X., Wang, Z., Richter, M., Klingmann, J.** Experimental and numerical study on bluff-body and swirl stabilized diffusion flames Fuel. – 2018. – Vol. 217, P. 352–364.

6 **Wang, L.-Y., Chatterjee, S., An, Q., Steinberg, A. M., Gülder, Ö. L.** Soot formation and flame structure in swirl-stabilized turbulent non-premixed methane combustion. Combust. Flame. – 2019. – Vol. 209, P. 303-312.

7 **Rashwan, S. S.** The effect of Swirl number and oxidizer composition on combustion characteristics of non-premixed methane flames. Energy Fuels. – 2018. – Vol. 32, No. 2, P. 2517–2526.

8 **Poorhoseinni, H., Saeedi, A., Moghiman, M.** Experimental and numerical investigation of the inlet air swirl angle effects on temperature profile and CO, NO pollutants. Energy Engineering Management. – 2012. – Vol. 2, No. 1, P. 32-39.

9 **Dostiyarov, A., Anuarbekov, M., Beloev, H., Iliev, I.** Numerical modelling biogas combustion in the novel burner // 2022 8th International Conference on Energy Efficiency and Agricultural Engineering (EE&AE). –Bulgaria. – 2022.

10 **Zinser, W.** Zur Entwicklung mathematischer Flammenmodelle für die Verbrennung technischer Brennstoffe // Fortschritt-Berichte VDI-Verlag. – 1984. – Vol. 6, No. 171. – 191 p.

11 **Westeuberd, A. A., Fristrom, R. M.** Methane-oxygen flame structure. II. Conservation of matter and energy in the one-tenth atmosphere flame // Journal of Physical Chemistry. – 1960. – Vol. 64, No. 10, – P. 1393-1398.

12 **Bugrahan, A.** Effect of biogas addition on combustion instability of propane flame at different external acoustic enforcement frequencies // Fuel. – 2022. – Vol.317. – 123498 p. <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2022.123498>.

13 **Babak, A., Ashkan, G., Sara, B.** Intensified biogas upgrading via various wastewater using microchannel // Chemical Engineering and Processing. – 2022. – 108927 p. <https://doi.org/10.1016/j.cep.2022.108927>.

14 **Badr, O., Aggour, M., Smouh, S., Abdelmajid, J.I., Bakraoui, M., Fadoua, K., Hassan, E.B., Tarik, K.** Experimental conception and thermo-energetic analysis of a solar biogas production system, C7ase Studies in Thermal Engineering. – 2022. – Vol. 30. – 101740 p. <https://doi.org/10.1016/j.csite.2021.101740>.

References

- 1 **Akhmedov, R. B.** Aerodinamika zakruchennoi strui [Aerodynamics of a swirling jet]. / Akhmedov, R.B., Balagula, T.B., Rashidov, F.K. [et al.]; edited by Akhmedov, R. B. Moscow: Energiya, 1977. – 240 p.

2 **Leibovich, S.** Vortex stability and breakdown- Survey and extension AIAA J. – 1984. – Vol. 22, No. 9, P. 1192-1206.

3 **Coghe, A., Solero, G., Scribano, G.** Recirculation phenomena in a natural gas swirl combustor Exp. Therm. Fluid Sci. – 2004. – Vol. 28, No. 7, P. 709-714.

4 **Sudarev, A. V., Mayev, V. A.** Gazoturbinnnye kamery sgoraniya s zakruchennym dvizheniem vozdukhnyh potokov [Gas turbine combustion chambers with swirling air flow]. – M., 1968. – 50 p.

5 **Tong, Y., Liu, X., Wang, Z., Richter, M., Klingmann, J.** Experimental and numerical study on bluff-body and swirl stabilized diffusion flames Fuel. – 2018. – Vol. 217, P. 352–364.

6 **Wang, L.-Y., Chatterjee, S., An, Q., Steinberg, A.M., Gülder, Ö. L.** Soot formation and flame structure in swirl-stabilized turbulent non-premixed methane combustion. Combust. Flame. – 2019. – Vol. 209, P. 303–312.

7 **Rashwan, S. S.** The effect of Swirl number and oxidizer composition on combustion characteristics of non-premixed methane flames. Energy Fuels. – 2018. – Vol. 32, No. 2, P. 2517–2526.

8 **Poorhoseinni, H., Saeedi, A., Moghiman, M.** Experimental and numerical investigation of the inlet air swirl angle effects on temperature profile and CO, NO pollutants. Energy Engineering Management. – 2012. – Vol. 2, No. 1, P. 32-39.

9 **Dostiyarov, A., Anuarbekov, M., Beloev, H., Iliev, I.** Numerical modelling biogas combustion in the novel burner // 2022 8th International Conference on Energy Efficiency and Agricultural Engineering (EE&AE). –Bulgaria. – 2022.

10 **Zinser, W.** Zur Entwicklung mathematischer Flammenmodelle für die Verbrennung technischer Brennstoffe // Fortschritt-Berichte VDI-Verlag. – 1984. – Vol. 6, No. 171. – 191 p.

11 **Westeuberd, A. A., Fristrom, R. M.** Methane–oxygen flame structure. II. Conservation of matter and energy in the one-tenth atmosphere flame // Journal of Physical Chemistry – 1960. – Vol. 64, No. 10. – P. 1393–1398.

12 **Buğrahan, A.** Effect of biogas addition on combustion instability of propane flame at different external acoustic enforcement frequencies // Fuel. – 2022. – Vol. 317. – 123498 p. <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2022.123498>.

13 **Babak, A., Ashkan, G., Sara, B.** Intensified biogas upgrading via various wastewater using microchannel // Chemical Engineering and Processing. – 2022. – 108927 p. <https://doi.org/10.1016/j.cep.2022.108927>.

14 **Badr, O., Aggour, M., Smouh, S., Abdelmajid, J. I., Bakraoui, M., Fadoua, K., Hassan, E. B., Tarik, K.** Experimental conception and thermo-energetic analysis of a solar biogas production system, C7ase Studies in Thermal Engineering. – 2022. – Vol. 30. – 101740 p. <https://doi.org/10.1016/j.csste.2021.101740>.

01.10.25 ж. баспаға түсті.

10.11.25 ж. түзетулерімен түсті.

27.02.26 ж. басып шығаруға қабылданды.

**М. А. Ануарбеков¹, А. К. Мерғалимова², М. А. Маханова³,
С. Б. Ыбрай⁴, М. Б. Айтмағамбетова⁵*

^{1,2,3,4,5}Казахский агротехнический исследовательский университет
имени С. Сейфуллина», Республика Казахстан, г. Астана.

Поступило в редакцию 01.10.25.

Поступило с исправлениями 10.11.25.

Принято в печать 27.02.26.

ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ АЭРОДИНАМИКИ СТАБИЛИЗАТОРА ГОРЕЛКИ СИНТЕТИЧЕСКИХ ГАЗОВ

Синтетический газ является малореакционным топливом с постоянно изменяющимся составом, что требует подбора оптимального угла наклона стабилизатора для его эффективного сжигания. Рассматривались три варианта уголкового стабилизатора: с углами 45°, 60°, а также стабилизатор в форме полукруга. Их геометрические параметры и после стабилизатора были проведены вычисления по численному моделированию эффективных аэродинамических характеристик с использованием программы Ansys Fluent. Вычислительные результаты численного моделирования используются при экспериментировании в будущем.

Основной целью было проведение численного анализа аэродинамического потока воздуха (или синтетический газ) в горелке для разработки физических моделей и определения оптимального угла стабилизатора, обеспечивающего эффективное сгорание топливно-воздушной смеси.

Численное моделирование продемонстрировало, что геометрия и угол наклона стабилизаторов оказывают значительное влияние на распределение скоростей и аэродинамические характеристики потока. Особое внимание было уделено области внутри стабилизаторов, где формируется зона рециркуляции. Хотя влияние изменения скорости потока на контуры распределения оказалось несущественным, в целом было установлено, что форма и угол наклона стабилизаторов значительно влияют на процессы смешивания топлива с воздухом, стабильность пламени, степень неполного сгорания и уровень выбросов оксидов азота.

Ключевые слова: уголковой стабилизатор, витой поток, аэродинамическое сечение, схема скоростей, зона рециркуляции.

*M.A. Anuarbekov¹, A.K. Mergalimova², M.A. Makhanova³,
S.B. Ybray⁴, M.B. Aitmagambetova⁵

^{1,2,3,4,5}Kazakh Agrotechnical Research University

named after S. Seifullin,
Republic of Kazakhstan, Astana

Received 01.10.25.

Received in revised form 10.11.25.

Accepted for publication 27.02.26.

NUMERICAL SIMULATION OF BURNER STABILIZER AERODYNAMICS FOR SYNTHETIC GASES

Synthetic gas is a non-reactive fuel with a constantly changing composition, which requires the selection of the optimal stabilizer angle for efficient combustion. Three options for Angle stabilizers were considered: with angles of 45°, 60°, as well as a semicircular stabilizer. The geometric values of these and their effective aerodynamic performance after the stabilizer were calculated by numerical modeling with the Ansys Fluent program. The computational results of numerical modeling are used in future experiments.

The main goal was to develop physical samples and conduct a quantitative analysis of aerodynamic air flow (or synthetic gas) in the fuel tank (or biogas) in order to find the optimal angle of the stabilizer, which ensures the effective combustion of the combined mixture of fuel and air.

Numerical simulations have demonstrated that the geometry and tilt angle of the stabilizers play a crucial role in shaping the velocity distribution and overall aerodynamic behavior of the flow. Special attention is paid to the internal parts of the stabilizers in the recirculation zone. Although the effect of the flows on the chains propagating due to fluctuations in their speeds was not particularly significant, it was found that the structure and tilt of the stabilizers have a significant impact on the processes of mixing fuel and air, flame stability, the level of incomplete combustion and the amount of nitrogen oxide release.

Keywords: corner stabilizer, swirling flow, aerodynamic profile, velocity diagram, recirculation zone.

FTAMP 50.33.00, 29.01.00, 28.17.23, 28.17.19

<https://doi.org/10.48081/BGQF1940>

**A. С. Аскарова¹, С. А. Болегенова²,
В. Ю. Максимов³, *Д. Д. Тоқтаров⁴**

^{1,2,3,4}Әл-Фараби атындағы Қазақ Ұлттық университеті,
Қазақстан Республикасы, Алматы қ.

¹ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-1797-1463>

²ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-5001-7773>

³ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-4120-1071>

⁴ORCID: <https://orcid.org/0009-0005-9557-9012>

*e-mail: toktarow@gmail.com

ЖОҒАРЫ КҮЛДІ КӨМІРДІ ТИІМДІ ЖАҒУ ҮШІН ОҒА ФОРСУНКАЛАРЫН ОРНАТУ БИІКТІГІН ОҢТАЙЛАНДЫРУ

Ұсынылған жұмыста БКЗ-75-39ФБ бу қазандығында отынды сатылы жағу кезінде жалын үстінен ауа беру (OFA – Over-Fire Air) технологиясын пайдалану үрдістерінің сандық зерттеу нәтижелері келтірілген. Моделдеу FloREAN бағдарламалық пакетінде RANS k-ε турбуленттілік моделін және алты ағынды модельді пайдалана отырып орындалды. Зерттеуде бес жұмыс режимі қарастырылды: базалық (OFA қолданылмаған) және форсункалар 8,0; 9,4; 10,0 және 12,0 м биіктіктерде орнатылған төрт нұсқада, ауа ағынының инжекторлар мен оттықтар арасындағы үлесі 18:82 қатынасында болды. Нәтижелерді ParaView бағдарламасында өңдеу қазандықтың шыға берісіндегі температуралар мен газдар (CO, CO₂, NO, NO₂, SO₂) концентрацияларының тік профилдерін алу және сипаттамалық статистикалық талдау жүргізу мүмкіндігін берді. Зерттеу нәтижелері көрсеткендей, OFA форсункаларын 9,4 м биіктікте орналастыру жанудың толықтығы мен ластаушы заттардың азаюы арасындағы оңтайлы тепе-теңдікті қамтамасыз етеді: түтін камерасынан шығатын NO_x (NO + NO₂) концентрациясы 564,34-тен 424,22 мг/Нм³-ке дейін төмендейді, CO₂ массалық үлесі 0,1562-ден 0,1459 кг/кг-ға дейін азаяды, ал СО мөлшері аздап артады. Сонымен қатар, шыға берістегі температура шамамен 325 °С-қа төмендейді. Барлық жұмыс режимдеріндегі SO₂ шығарындылары Қазақстан

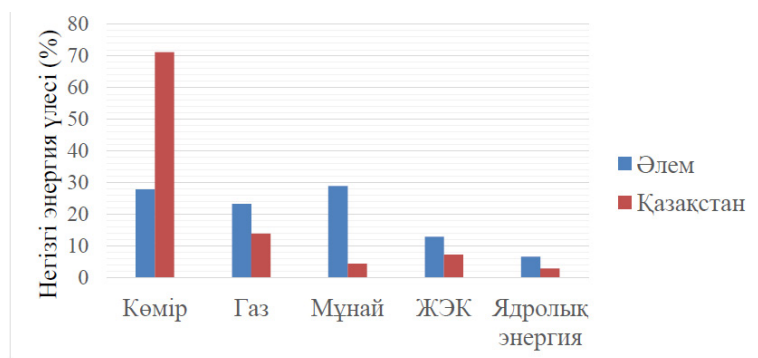
Республикасының нормативтік шегінде қалады. Алынған нәтижелер ауа ағынының 18%-ын OFA форсуноктарына беру және оларды шамамен 9,4 м биіктікте орнату БКЗ-75 типті қазандықтарда NO_x және CO_2 шығарындыларын азайтатындығын, жылудық қуатты төмендетпей жұмыс істеуге мүмкіндік беретіндігін растайды және бұл технологияны Қазақстанның жылу электр орталықтарына (ЖЭО) енгізу ұсынылады.

Кілтті сөздер: CFD модельдеу, БКЗ-75 қазандығы, ұнтақталған көмір отыны, OFA технологиясы, NO_x азайту, жануды оңтайландыру, түтін газдарының шығарындылары.

Кіріспе

Көмір қайта жаңартылатын энергия көздерінің жедел дамуына және өсіп келе жатқан климаттық міндеттемелерге қарамастан, әлі күнге дейін әлемдік энергетиканың негізі болып қалуда. Халықаралық энергетика агенттігінің (ХЭА) [1] деректері бойынша 2024 жылы көмір әлемдік бастапқы энергия тұтынуының 27,9%-ын және әлемдік электр энергиясын өндірудің 34%-ын қамтамасыз етті. Көмір үлесінің біртіндеп төмендеуі болжанғанымен, көмір әлі де көмір өндіруші елдердің энергия теңгерімінде ондаған жылдар бойы маңызды рөл атқаратын болады.

Қазақстанда 33,6 млрд тоннаға жуық көмір қоры бар, ал 2023 жылы көмірдің үлесіне бастапқы энергияның 49,6%-ы және электр энергиясының 71,2%-ы тиесілі болды [2]. Алайда, құрамында күлі жоғары қарағандылық көмірді жағатын қолданыстағы БКЗ-75 қазандықтар паркі Қазақстан Республикасының қазіргі заманғы экологиялық нормаларына жиі сәйкес келмейді [3;4]. Бұл шығарындыларды азайту және тиімділікті арттыру үшін жану процестерін жаңғырту қажеттілігін тудырады.



1-сурет – Энергетикалық баланс құрылымын салыстыру: әлем және Қазақстан (2024)

2024–2025 жылдарға арналған жаһандық энергетикалық баланс құрылымында қазба отындары әлі де басым болып тұр. Халықаралық энергетика агенттігінің (ХЭА) [1] және Global Electricity Review 2025 есебінің [5] деректері бойынша, бастапқы энергияның негізгі үлесі мұнайға (шамамен 29 %), одан кейін көмір (26 %) және табиғи газға (22 %) тиесілі. Жаңартылатын энергия көздері (күн, жел, гидро және биоэнергетиканы қоса алғанда) әлемдік энергия балансының шамамен 15% үлесін алады, ал атом энергетикасының үлесі шамамен 5% -ды құрайды.

Қазақстан үшін энергия өндіру құрылымы әлемдік құрылымнан айтарлықтай ерекшеленеді: ҚР Ұлттық статистика бюросының [6] және KEGOC [2] деректері бойынша, электр энергиясының 60%-дан астамы көмір есебінен, шамамен 20 %-ы табиғи газ есебінен, 10%-ы гидроэнергетика және 5%-дан азы жаңартылатын энергия көздері есебінен өндіріледі.

Өнеркәсіптік қазандықтардағы азот оксидтерінің (NO_x) шығарындыларын азайтудағы ең кең тараған технологияларының бірі - жалын үстінен ауа беру (OFA - Over Fire Air) технологиясы. Жалпы ауа көлемінің 10-30%-ын негізгі жану аймағынан жоғары берген кезде жалынның ең жоғарғы температурасы төмендейді және реакция аймағындағы оттегі концентрациясы төмендейді, бұл термиялық NO_x түзілуін шектейді [7;8]. Көптеген халықаралық зерттеулер ірі энергия қазандықтары үшін OFA технологиясының тиімділігін растайды [9;10].

Қазақстанда OFA технологиясын енгізу бойынша зерттеулер алғаш рет БКЗ-75 қазандығына қатысты [11;12] еңбектерде жүргізілген. Бұл зерттеулердің нәтижелері бойынша OFA инжекторларына және оттық құрылғыларына ауа берудің оңтайлы арақатынасы жану камерасына түсетін жалпы ауа көлемінің 18:82 бөлігін құрайды. Дәл осы арақатынас үшпа компоненттердің толық жануын, жалынның тұрақтылығын, NO_x түзілуінің минималды деңгейін және түтін шығу арнасында СО концентрациясының айтарлықтай өспеуін қамтамасыз етеді.

Расталған деректерге сүйенсек, қазіргі зерттеуде де OFA-инжекторлары беретін ауаның 18 %-ы қолданылды, бұл алдыңғы зерттеулердегі [13;14;15;16] салыстырмалылық пен сабақтастықты қамтамасыз етеді.

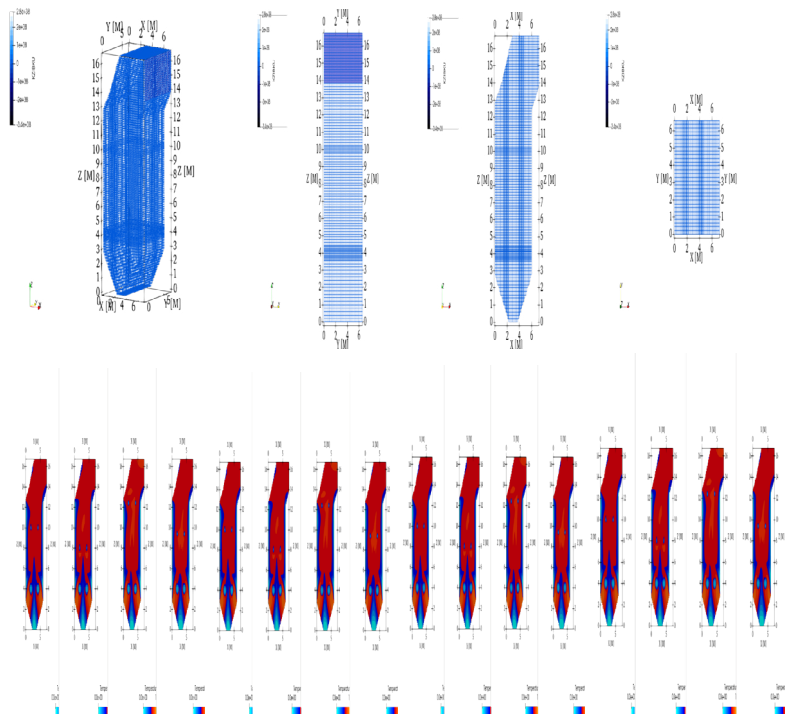
Айтарлықтай ілгерілеуге қарамастан, шетелдік зерттеулердің басым бөлігі қуаты ≥ 500 МВт ірі энергия блогтарына арналған, ал жоғары күлді көмірмен жұмыс істейтін орта қуатты (75 т/сағ) қазандықтарға қатысты зерттеулер шектеулі. Мұндай қондырғылардың Қазақстан энергетикасындағы жоғары үлесін ескере отырып, БКЗ-75 қазандығында OFA-форсуноктарын

оңтайлы орналастыруды зерттеу ғылыми және тәжірибелік тұрғыда аса маңызды.

Аталмыш жұмыстың мақсаты жоғары күлді Қарағанды көмірін жағу кезінде БКЗ-75 қазандығының жану камерасына ауаны сатылы беру (OFA) процесін кешенді CFD-талдау арқылы зерттеу, шығарындыларды азайту үшін форсункаларды орнатудың оңтайлы биіктігін анықтау және нәтижелерді ұлттық экологиялық нормативтермен салыстыру болып табылады.

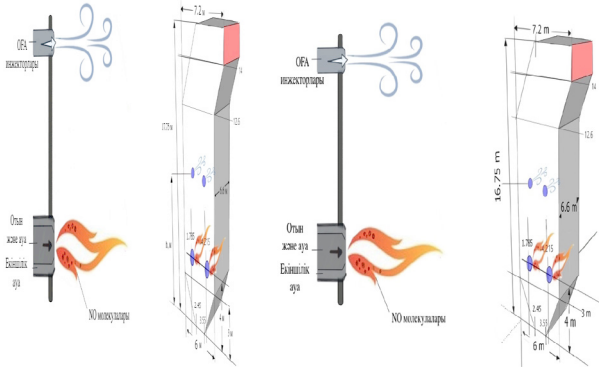
Материалдар мен әдістері

Зерттеу БКЗ-75-39 ФБ қазандығының жану камерасы үшін жүргізілді. Геометриялық модель (7,2×6,6×16,75м) табиғи айналымы бар суқұбырлы қазандықты және төрт алдыңғы жағындағы оттықты сипаттайды. Есептік тор - оттықтар мен OFA форсункалары аймақтарында жергілікті тығыздатылған 450 000 ұяшықты қамтиды (2-сурет).



2-сурет – БКЗ-75-39 ФБ қазандығының жану камерасының геометриясы мен есептік торы

OFA форсункалары оттық деңгейінен (z=4 м) 8; 9,4; 10 және 12 м биіктікте орналасқан. Инжекторлардағы ауаның үлесі жалпы ауа шығынының 18 %-ын құрап, [11;12] деректерінде берілген ұсынымдарға сәйкес келеді. Бұл мән жалынның тұрақтылығын қамтамасыз етеді және жануды төмендетпей, NO_x түзілуін тиімді шектеуге мүмкіндік береді.



3-сурет – Жану камерасының сызбасы және OFA беру принципі

БКЗ-75-39ФБ қазандығында Қарағанды бассейнінің КР-200 маркалы қатардағы көмір ұнтағы жағылады. Қазандық қондырғысының негізгі техникалық сипаттамасы, сондай – ақ пайдаланылатын ұнтақты көмір отынының құрамы 1 – кестеде берілген.

1-кесте – БКЗ-75-39ФБ қазандығы жану камерасының базалық режимдегі техникалық сипаттамалары

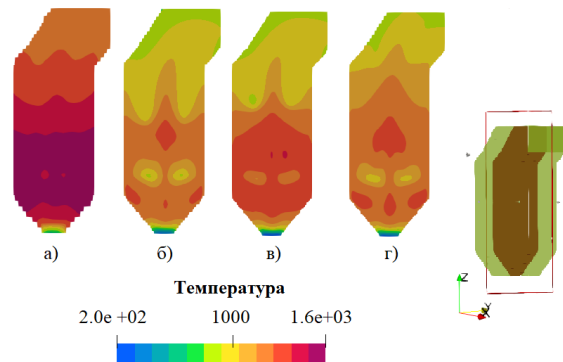
№	Атауы	Белгіленуі	Өлшем бірлігі	Мәні
1	Көмір түрі	КР200	-	-
2	Ұшпа заттардың жанғыш массаға қатынасы	УГ	%	22
3	Жұмыс ылғалдылығы	WP	%	10.6
4	Жану жылыуы	QPH	ккал/кг	4433
5	Қазандықтағы оттықтар саны	НГ	шт.	4
6	Бір оттықтың отын шығару өнімділігі	ВГ	т/час	3.2

Пайдаланылған көмір құрамы, %						
C	H ₂	O ₂	S ₂	N ₂	H ₂ O	Күл
43.21	3.6	5.24	1.04	1.21	10.6	35.1

Нәтижелер және талқылау

Жылу өнімділігіне зерттеу жүргізу ұнтақты көмір отынын жағу кезіндегі жылу мен масса алмасу процестерін модельдеудің маңызды кезеңі болып табылады. Бұл тәсіл жану камерасының барлық көлемі мен оның шығу аймағындағы температуралық өрістерді анықтауға мүмкіндік береді.

4–5-суреттерде жану камерасындағы көмір ұнтағы ағынының жылулық сипаттамасын бейнелейтін температуралық профильдер көрсетілген. Көріп отырғандай, оттық құрылғылар орналасқан тұсқа жақын жердегі температураның мәні жоғары деңгейге жетеді, өйткені бұл жерде ағынның құйынды сипатына байланысты конвективті тасымал ең жоғары мәнге ие болады, нәтижесінде көмір бөлшектерінің тұру уақыты артып, осы аймақтағы температураның өсуіне әкеледі. Дәл оттықтар белдеуі аймағында, отын мен тотықтырғыш өзара әрекеттесетін жерде, жоғары деңгейде жылу бөлетін химиялық реакциялар неғұрлым қарқында жүреді.

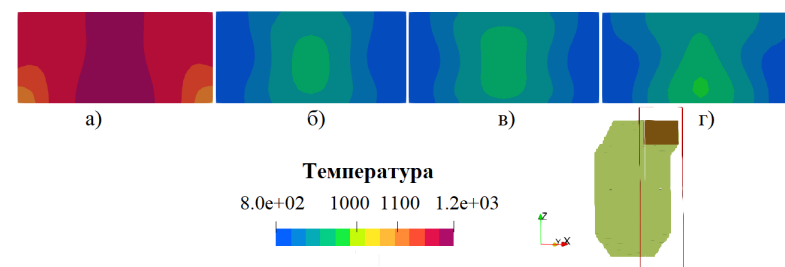


4- сурет – Көлденең қимадағы температура өрісі [°C] ($y = 3,3$) (a) Базалық режим (b) OFA 8 м (c) OFA 9,4 м (d) OFA 12 м

4-суретте турбулентті зат алмасу (аэрокоспаның қозғалысы) ұнтақты көмір жалынының жану камерасының барлық көлеміне, суық воронкадан бастап қазанның бұрылу камерасына дейін таралуына әсер ететіні

көрсетілген. Бұл құбылыс көрсетілген қималардағы орташа температура мәндерімен дәлелденеді, мұнда температура шамамен 1000 °C аралығында өзгеріп отырады. Егер OFA инжекторларының әр түрлі орналасуын салыстырсақ, OFA 9,4 м деңгейінің артықшылығы айқын көрінеді, себебі оның жоғары температура аймақтары басқа конфигурацияларға қарағанда едәуір кеңірек.

Келесі, жану камерасының шығу бөлігіне қарай жылжыған сайын химиялық процестердің қарқындылығы төмендейді (5 - сурет), OFA инжекторларын қолданған кезде температура біртіндеп төмендеп, шығу аймағында шамамен 850 °C деңгейінде болады. Бұл температура қалыпты режиммен салыстырғанда айтарлықтай төмен, алайда әртүрлі OFA конфигурацияларын салыстырғанда олардың арасындағы айырмашылық елеулі емес.



5-сурет – Қазандықтың шыға берісіндегі температуралық өріс ($x = 7,1$) (a) Базалық режим (b) OFA 8 м (c) OFA 9.4 м; (d) OFA 12 м

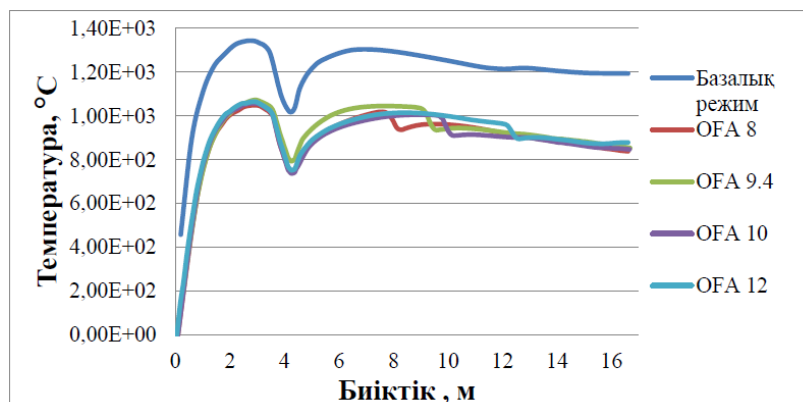
БКЗ-75 қазандығының жану камерасы биіктігінде температураның таралуы екінші реттік ауаны (OFA) әртүрлі беру режимдерінде 6-суретте көрсетілген. OFA қолданылмаған базалық режимде жалынның ең жоғары температурасы оттық аймағында ($z \approx 2-3$ м) шамамен 1450 °C-қа жетеді, содан кейін биіктіктегі температураның біртіндеп төмендеуі байқалады, бұл ұнтақты көмір отынын бір сатылы жағуға тән құбылыс.

Зерттелген конфигурациялар ішінде ең қолайлы температура таралуын 9,4 м және 10 м биіктікте орналасқан форсункалар қамтамасыз етеді (5-сурет). Осы режимдерде жалын өзегіндегі температура отынның толық жануына жеткілікті деңгейде сақталады, дегенмен NO_x -тың термиялық түзілуіне ықпал ететін артық жергілікті максимумдар болмайды.

Салыстыра қарасақ, базалық режимде (OFA-сыз) оттықтардың үстінде екінші температуралық шоқ байқалады, бұл NO_x түзілуінің артуына әкеледі. Форсункалар 12 м биіктікте орналасқандықтан араласу процесі

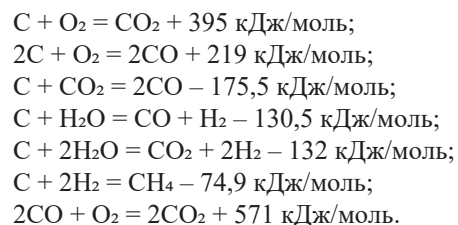
кешеуілдейді, ауа берілетін жазықтықтан төмен жергілікті қызып кету аймақтары сақталады.

Осылайша, форсуналарды 9,4 м биіктікте орналастыру конфигурациясы жану тұрақтылығы, отынның толық жануы және экологиялық көрсеткіштер арасындағы оңтайлы тепе-теңдікті қамтамасыз етеді. Бұл нәтиже орта қуатты қазандықтардағы ОФА-ны оңтайландыруға арналған алдыңғы зерттеулердің деректерімен үйлеседі.

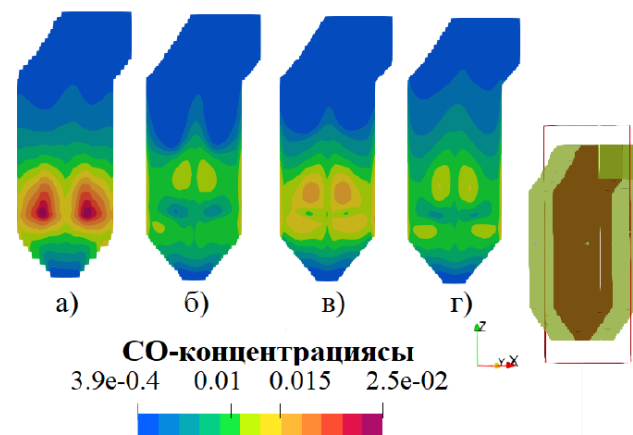


6-сурет – Қазандық биіктігі бойынша температураны бөлу

Көміртектің жоғары температурада жану процесінің соңғы нәтижесі болып оның оттекпен қосылуының салдарынан не көміртек тотығының (CO), не көмірқышқыл газының (CO₂) түзілуі саналады. Төмен температуралы жану кезінде пеш камерасында көміртектің CO₂ түзе отырып тотығу реакциясы басым болады, ал жоғары температуралы жағдайда негізгі реакциялар бөлшектердің сыртқы бетінде және кеуектерінің ішінде жүреді:

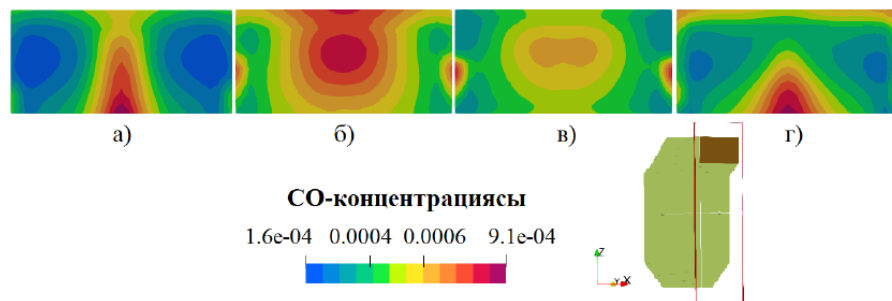


Осылайша, отын құрамындағы көміртектің тотықтырғыштағы оттекпен әрекеттесуінің химиялық процестері, көміртек оксидтерінің (CO және CO₂) түзілуіне әкелетін, жанудың әртүрлі кезеңдерінде бірізді жүретін реакциялармен сипатталады. Жану процесінде CO және CO₂ концентрацияларының өзгеру динамикасын көрсететін бұл механизм (7–11 - суреттерде) толықтай анық көрсетілген.



7-сурет – Қазандықтан алынған бойлық қимадағы СО концентрациясының таралуы [кг/кг] (y=3,3): (а) Базалық режим; (б) ОФА 8 м; (с) ОФА 9,4 м; (д) ОФА 12 м.

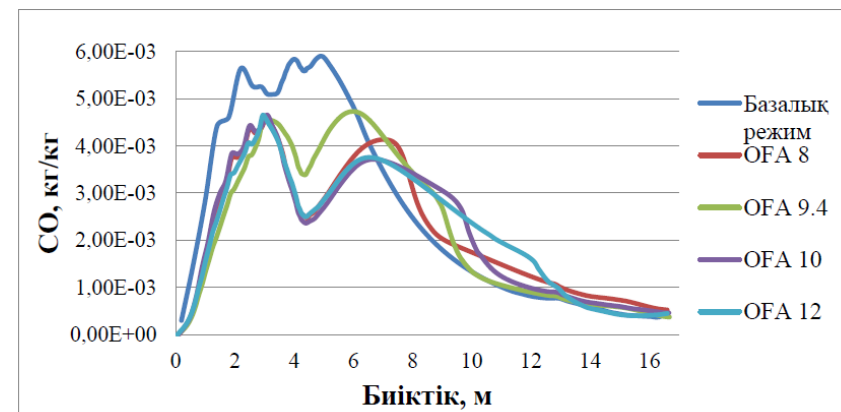
7 – суреттегі қазандықтың көлденең қимасын талдай отырып, ОФА 8 м және ОФА 12 м кезінде оттық аймағындағы көміртек тотығының концентрациясы ОФА 9,4 м жағдайымен салыстырғанда төмен екенін және орташа шамамен 0.002 кг/кг екенін байқауымызға болады. Алайда қазандықтан шыға берісте керісінше көрініс байқалады: мұнда ОФА 9,4 м кезінде концентрация төмен болып, көміртек тотығының жоғары концентрациялы аймақтары байқалмайды және шамамен 0.0004 кг/кг-ге тең.



8 - сурет – Қазандықтан шыға берістегі CO концентрациясының таралуы [кг/кг] ($x=7,1$): (a) Базалық режим; (b) OFA 8 м; (c) OFA 9,4 м; (d) OFA 12 м.

9 – суреттегі талдау көрсеткендей, CO-ның ең жоғары концентрациялары оттық аймағының орталық жазықтығына жақын жерде байқалады, мұнда температура шамамен 1000°C -қа жетеді. Бұл аймақта көміртек құрамды отын мен тотықтырғыштың (O_2) жоғары концентрациясы жану реакцияларының қарқынды жүруіне ықпал етеді. Нәтижесінде CO түзілуінің айқын түрі оттықтар орналасқан аймақтың дәл артқы тұсында байқалады.

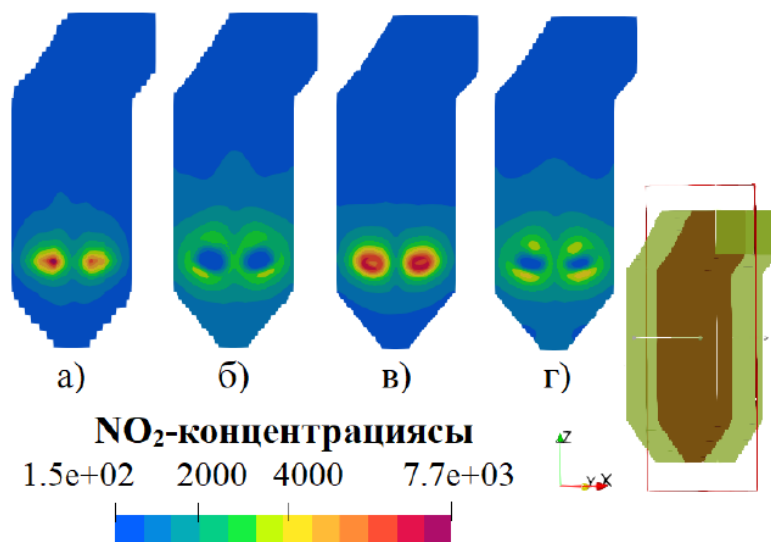
Түрлі OFA конфигурациялары үшін CO профильдерін салыстыру оттықтан шығу кезінде базалық режимде (OFA-сыз) CO-ның ең аз шоғырлануы байқалатынын көрсетеді. 12 м және 9.4 м биіктікте орналасқан OFA форсуноктарын пайдалану кезінде CO-ның біршама жоғары қалдық концентрациялары шоғырлануы тіркелді, бұл жалыннан кейінгі аймақта толық жанбауды көрсетеді. Мұндай үрдіс OFA технологиясы NO_x шығарындыларын төмендету тиімділігінің артуына қарамастан, егер форсуноктарды орнату биіктігі мен араласу шарттары қалыпты таңдалмаса, CO тотығу толықтығын аздап азайтуы мүмкін екенін көрсетеді.



9-сурет – CO концентрациясының биіктік бойынша таралуы.

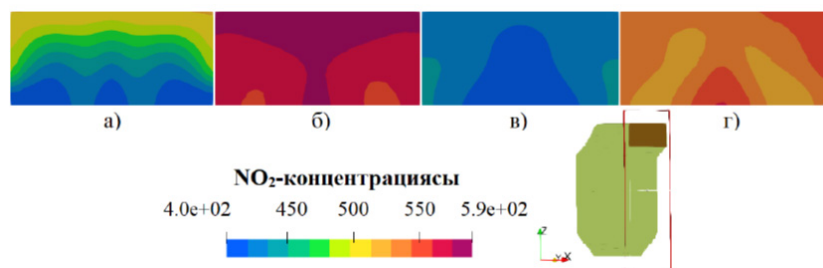
CFD модельдеу және визуализация нәтижелерін талдау азот оксидінің (NO_x) бастапқы түзілу аймағы жоғары температура мен жоғары қарқынды құйын ағындарының аймақтарына сәйкес келетінін көрсетеді. Зерттелген ВКЗ-75 қазандық пешінде бұл аймақ оттық аймағының жанында орналасқан ($z \approx 4,0$ м). Отынды ауа қоспасынан туындайтын күшті турбуленттілік отын мен тотықтырғыштың белсенді араласуына ықпал етеді, ал жалынның өзек температурасы ($\sim 1000^{\circ}\text{C}$) NO_x түзілуіне қолайлы жағдайлар жасайды. Осылайша, бұл аймақ жылулық және отынмен байланысты азот оксидтерінің негізгі көзі болып табылады.

OFA инжекторларының орналасуының әртүрлі конфигурациялары кезінде көлденең қимадағы шоғырлану аудандарын салыстырғанда (13-сурет) ең төменгі концентрация мәндері 8 м және 12 м OFA орнату биіктіктерінде байқалатынын көрсетеді, мұндағы қыздырғыш аймағындағы NO_2 мәні шамамен 600 мг/Нм^3 құрайды.



10-сурет – Жану камерасының көлденең қимасындағы NO_2 концентрациясы [$\text{мг}/\text{Нм}^3$] ($y = 3.3$) (a) базалық режим; (b) OFA 8 м; (c) OFA 9.4 м; (d) OFA 12 м

Жану камерасының шығысында азот диоксидінің орташа концентрациясы OFA инжекторын орнату биіктігіне айтарлықтай байланысты (11 - сурет). NO_2 шығысының ең төменгі мәндері 9,4 м OFA биіктігінде байқалады, бұл басқа конфигурация нұсқаларымен салыстырғанда NO_x шығарындыларының ең тиімді төмендеуін көрсетеді.



11-сурет – Жану камерасының шыға берісіндегі NO_2 концентрациясы [$\text{мг}/\text{Нм}^3$] ($y = 3.3$) (a) базалық режим; (b) OFA 8 м; (c) OFA 9,4 м; (d) OFA 12 м

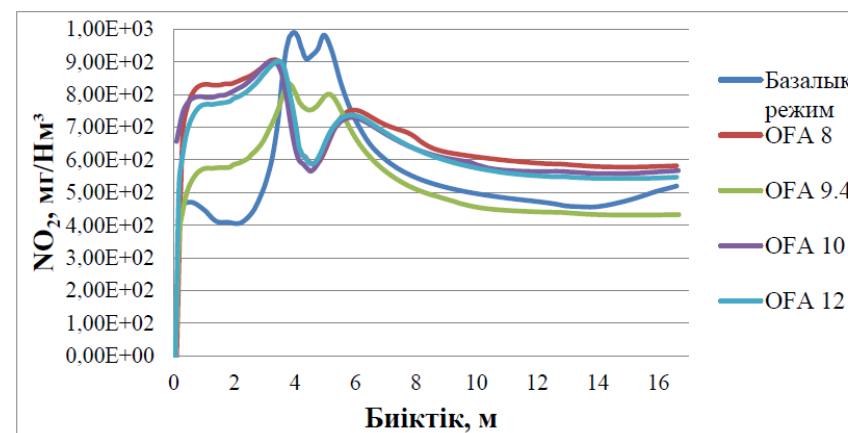
NO_x -ның ең жоғары концентрациясы отын азотымен (Қарағанды көміріндегі мөлшері 1,21%) және ауадағы азотпен (79% N_2) байланысты. Қатты отынның жануы кезінде азот оксидтері екі кезеңде түзіледі:

- ұшқыш заттармен байланысқан азоттың бір бөлігі жану кезінде бөлініп, NO -ға айналады;
- көміртегі қалдығына (кокс) байланысқан қалған азот көміртегі бөлшегінің жануы кезінде NO түзеді.

Бұл механизмдердің салыстырмалы үлесі отын сипаттамаларымен, атап айтқанда, ұшқыш заттардың үлесімен және деволатизация процесінің белсендіру энергиясымен анықталады.

10-12 суреттерде көрсетілгендей, температураның төмендеуіне және жоғарғы қабаттардағы белсенді азот қосылыстары мен оттегінің мөлшерінің азаюына байланысты пештің биіктігінің артуымен NO_x концентрациясы біртіндеп төмендейді. Бұл екі фактор да биіктіктің артуымен азот оксидінің түзілу жылдамдығының төмендеуіне ықпал етеді.

OFA берудің әртүрлі конфигурациялары кезінде NO_x бейіндерін салыстырмалы талдау, оттықтан шыға берістегі азот оксидтерінің ең аз шоғырлануы 9,4 м биіктікте форсункаларды орнату кезінде қол жеткізілетінін көрсетеді. Бұл биіктік отынның тұрақты және толық жануын сақтай отырып, NO_x шығарындыларын барынша азайту тұрғысынан OFA форсункаларын орналастыруда ең тиімді екеніне куәлік етеді.



12-сурет – NO_2 концентрациясының биіктік бойынша таралуы

Жанудың бес режимі зерттелді: базалық (OFA-сыз) және 8, 9,4, 10 және 12 метр биіктікте орнатылған екінші реттік ауа форсуналары бар нұсқалар. Бұл деректер 2-кестеде келтірілген. Барлық OFA конфигурацияларында екінші реттік ауаның үлесі оттыққа берілетін жалпы ауаның 18%-ын құрады.

2-кесте – Жану камерасының шығысындағы концентрациялардың сипаттамалық статистикасы

	CO, [кг/кг]	CO ₂ , [кг/кг]	SO ₂ , [кг/кг]	Температура, [°C]	NO ₂ , [мг/Нм ³]	NO, [мг/Нм ³]
OFA 12	4.34×10 ⁻⁴	13.97×10 ⁻²	1.32×10 ⁻³	864.64	534.62	348.70
OFA 10	4.86×10 ⁻⁴	13.67×10 ⁻²	1.30×10 ⁻³	846.28	549.30	358.27
OFA 9.4	4.68×10 ⁻⁴	14.59 ×10 ⁻²	1.37×10 ⁻³	862.51	424.22	276.69
OFA 8	5.85×10 ⁻⁴	13.63×10 ⁻²	1.29 x 10 ⁻³	851.65	571.30	372.62
Базалық режим	3.74×10 ⁻⁴	15.62×10 ⁻²	1.44 x 10 ⁻³	1188.25	564.34	339.48

Форсуна 9,4 м биіктікте орнатуда NO_x концентрациясы 564,34-тен 424,22 мг/Нм³-ге дейін, ал CO₂ концентрациясы 15,62×10⁻²-ден 14,59×10⁻² кг/кг-ға дейін төмендеді. Осы кезде СО концентрациясы 3,74×10⁻⁴-тен 4,68×10⁻⁴ кг/кг-ға дейін өсті, ал пайдаланылған газдың температурасы шамамен 325 °C-қа төмендеді. SO₂ концентрациясы барлық режимдерде стандартты шектерде қалды.

Бұл нәтижелер форсуна 9,4 м биіктікте орнату ең тиімді екенін көрсетіп, ауа араласуы мен газдың жану аймағында болу уақытының оңтайлы тепе-теңдігін қамтамасыз етеді. OFA 8 м кезінде CO₂ жануы біршама толығырақ болғанына қарамастан, бұл NO_x шығарындыларының артуымен қатар жүрді. OFA 12 м кезінде жану аймағының ішкі аумағына ауаның жеткіліксіз енуінен тиімділік төмендеді.

Өңдеу үшін CFD нәтижелерінен алынған және ParaView бағдарламасындағы бойлық және көлденең кималар (жану аймағы, OFA аймағы және оттықтың шығысы) көрсетілген температура және газ концентрациясы өрістері (CO, CO₂, NO_x, SO₂) пайдаланылды.

Қаржыландыру туралы ақпарат

Зерттеуді Қазақстан Республикасы Ғылым және жоғары білім министрлігінің Ғылым комитеті қаржыландырады (грант №BR28713563).

Қорытынды

Күлділігі жоғары көмірді жағу кезіндегі OFA-ның квазистабильді күйінің CFD талдауы нәтижесінде, 9,4 м форсуна 9,4 м биіктігінде OFA форсуналарына 18% ауа берілуі төмендегені қамтамасыз ететіні анықталды:

- NO_x 24,83%-ға азаюы;
- CO₂ 6,58%-ға артуы және жану тиімділігінің артуы;
- шығарындылардың ұлттық стандарттарға сәйкестігі;
- қазандықтың жылу тиімділігін сақтау немесе жақсарту.

Айта кетер болсақ, тек СО концентрациясын бағалаған кезде, 12 м OFA нұсқасы ең жақсы нәтижені көрсетеді, оттықтың шыға берісіндегі СО шығарындылары төмен. Сонымен қатар, 8 м OFA нұсқасы CO₂ концентрациясының біршама жоғары екенін көрсетті, бұл толық жануды көрсетеді. Дегенмен, биіктік нұсқалары (8–12 м) арасындағы айырмашылықтар аз және пайдалануға рұқсат етілген ауытқу шегіне сәйкес келеді.

Қоршаған орта тұрғысынан алғанда, азот оксидтері (NO_x) қатаң ережелерге және олардың ауа сапасы мен адам денсаулығына әсеріне байланысты ең маңызды ластаушы заттар болып қала береді. Осыған байланысты 9,4 м OFA конфигурациясы ең жақсы нәтижелерді көрсетті, тұрақты жануды сақтай отырып, NO_x шығарындыларын айтарлықтай азайтты. Бұл нұсқа зерттелген барлық режимдер арасында ластаушы заттарды азайту мен оттықтың оңтайлы жұмысы арасындағы ең теңгерімді және тиімді шешім болып табылады.

Алынған нәтижелер BKZ-75 қазандықтарын Over Fire Air (OFA) технологиясын қолдана отырып жаңғыртудың әлеуетін растайды және Қазақстандағы жылу электр станцияларында автоматты бақылау жүйелерін (АМЖ) енгізуде қолдануға мүмкіндік береді.

Пайдаланылған деректер тізімі

1 International Energy Agency. Statistical Review of World Energy 2024 [Текст]. – Paris : IEA, 2025.

2 KEGOC JSC. Годовой отчёт 2023 [текст]. – Астана : KEGOC, 2024. – URL: <https://ar2023.kegoc.kz/en/download/electricity-balance>.

3 Ministry of Ecology, Geology and Natural Resources of the Republic of Kazakhstan. Кодекс «Об охране окружающей среды» [Текст]. – Астана, 2021.

4 Samruk Energy. Годовой отчёт 2023 [Текст]. – Астана : Samruk Energy, 2024.

5 Ember. Global Electricity Review 2025 [Текст]. – London : Ember, 2025. – URL: <https://ember-climate.org/>

6 Агентство по стратегическому планированию и реформам Республики Казахстан. Энергетическая статистика 2024 [текст]. – Астана : Бюро национальной статистики, 2024. – URL: <https://stat.gov.kz/en/industries/business-statistics/stat-energy/>

7 Zhou, H., Cen, K., Fan, J. Modeling and optimization of the NOx emission characteristics of a tangentially fired boiler with artificial neural networks // Energy. – Vol. 29, Issue 1, 2004. – P. 167-183. – <https://doi.org/10.1016/j.energy.2003.08.004>.

8 Li, Z., Miao, Zh., Zhou, Y., Wen, Sh., Li, J. Influence of increased primary air ratio on boiler performance in a 660 MW brown coal boiler // Energy. – Vol. 152, 2018. – P. 804–817. – <https://doi.org/10.1016/j.energy.2018.04.001>.

9 Jiang, Y., Li, X., Chen, Z., Wang, X. Optimization of operating conditions to achieve combustion stability and reduce NOx emission at half-load for a 550-MW tangentially fired pulverized coal boiler. // Fuel. – 2021. – № 306. – P. 121727. – <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2021.121727>.

10 Zhou, K., Liu, J., Chen, L., Zhang, X., Wang, Y. Numerical research on combined OFA and FGR for boiler emissions [Текст] // Energies. – 2020. – Vol. 13, No. 3. – P. 725. – <https://doi.org/10.3390/en13030725>.

11 Messerle, V. E., Askarova, A. S., Bolegenova, S. A. Heat and mass transfer in BKZ-75 combustion chamber with OFA [Текст] // Thermophysics and Aeromechanics. – 2019. – Vol. 26, No. 2. – P. 295–311. – <https://doi.org/10.1134/S0869864319020033>.

12 Askarova, A. S., Bolegenova, S. A., Messerle, V. E. 3D modeling of combustion processes for solid fuels in industrial boilers [Текст] // Energies. – 2021. – Vol. 14, No. 5. – P. 1236. – <https://doi.org/10.3390/en14051236>.

13 Bolegenova, S., Askarova, A., Georgiev, A., Nugymanova, A., Maximov, V., Bolegenova, S., Adil'bayev, N. Staged supply of fuel and air to the combustion chamber to reduce emissions of harmful substances// Energy. – 2024. - Vol. 293, – No130622. – <https://doi.org/10.1016/j.energy.2024.130622>.

14 Bolegenova, S., Askarova, A., Georgiev, A., Nugymanova, A., Maximov, V., Bolegenova, S., Mamedov, B. The use of plasma technologies to optimize fuel combustion processes and reduce emissions of harmful substances// Energy. – 2023. – Vol. 277. – No 127635. – <https://doi.org/10.1016/j.energy.2023.127635>

15 Askarova, A., Georgiev, A., Bolegenova, S., Beketayeva, M., Maximov, V., Bolegenova, S. Computational modeling of pollutants in furnaces of pulverized coal boilers of the republic of Kazakhstan. // Energy. – 2022. – Vol. 258. – No 124826. – <https://doi.org/10.1016/j.energy.2022.124826>

16 Askarova, A., Safarik, P., Bolegenova, S., Nugymanova, A., Maximov, V., Askarov, N., Bolegenova, S. Using Plasma Activation to Optimize the Combustion Process and Minimize Harmful Emissions. // Chemical Engineering and Technology. – 2021. – Vol. 44, Issue 11. – P. 1970 – 1977.

References

1 International Energy Agency. Statistical Review of World Energy 2024 [Текст]. – Paris : IEA, 2025.

2 KEGOC JSC. Godovoj otchyot 2023 [Annual report 2023] [Text]. – Astana:KEGOC,2024.– URL : <https://ar2023.kegoc.kz/en/download/electricity-balance>.

3 Ministry of Ecology, Geology and Natural Resources of the Republic of Kazakhstan. Kodeks «Ob okhrane okruzhayushchej sredy» [Environmental Protection Code] [Text]. – Astana, 2021.

4 Samruk Energy. Godovoj otchyot 2023 [Annual report 2023] [Text]. – Astana : Samruk Energy, 2024.

5 Ember. Global Electricity Review 2025 [Текст]. – London : Ember, 2025. – URL: <https://ember-climate.org/>

6 Agentstvo po strategicheskemu planirovaniyu i reformam Respubliki Kazakhstan. [Agency for Strategic Planning and Reforms of the Republic of Kazakhstan] Energeticheskaya statistika [Energy statistics] 2024 [Text]. – Astana : Byuro natsional'noj statistiki [Bureau of National Statistics], 2024. – URL: <https://stat.gov.kz/en/industries/business-statistics/stat-energy>

7 Zhou, H., Cen, K., Fan, J. Modeling and optimization of the NOx emission characteristics of a tangentially fired boiler with artificial neural networks // Energy. – Vol. 29, Issue 1, 2004. – P. 167–183. – <https://doi.org/10.1016/j.energy.2003.08.004>.

8 Li, Z., Miao, Zh., Zhou, Y., Wen, Sh., Li, J. Influence of increased primary air ratio on boiler performance in a 660 MW brown coal boiler // Energy. – Vol. 152, 2018. – P. 804–817. – <https://doi.org/10.1016/j.energy.2018.04.001>.

9 Jiang, Y., Li, X., Chen, Z., Wang, X. Optimization of operating conditions to achieve combustion stability and reduce NOx emission at half-load for a 550-MW tangentially fired pulverized coal boiler. // Fuel. – 2021. – № 306. – P. 121727. – <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2021.121727>.

10 Zhou, K., Liu, J., Chen, L., Zhang, X., Wang, Y. Numerical research on combined OFA and FGR for boiler emissions [Текст] // Energies. – 2020. – Vol. 13, No. 3. – P. 725. – <https://doi.org/10.3390/en13030725>.

11 Messerle, V. E., Askarova, A. S., Bolegenova, S. A. Heat and mass transfer in BKZ-75 combustion chamber with OFA [Текст] // Thermophysics and Aeromechanics. – 2019. – Vol. 26, No. 2. – P. 295–311. – <https://doi.org/10.1134/S0869864319020033>.

12 Askarova, A. S., Bolegenova, S. A., Messerle, V. E. 3D modeling of combustion processes for solid fuels in industrial boilers [Текст] // Energies. – 2021. – Vol. 14, No. 5. – P. 1236. – <https://doi.org/10.3390/en14051236>.

13 Bolegenova, S., Askarova, A., Georgiev, A., Nugymanova, A., Maximov, V., Bolegenova, S., Adil'bayev, N. Staged supply of fuel and air to the combustion chamber to reduce emissions of harmful substances// Energy. – 2024. – Vol. 293, – No130622. – <https://doi.org/10.1016/j.energy.2024.130622>.

14 Bolegenova, S., Askarova, A., Georgiev, A., Nugymanova, A., Maximov, V., Bolegenova, S., Mamedov, B. The use of plasma technologies to optimize fuel combustion processes and reduce emissions of harmful substances// Energy. – 2023. – Vol. 277. – No 127635. – <https://doi.org/10.1016/j.energy.2023.127635>

15 Askarova, A., Georgiev, A., Bolegenova, S., Beketayeva, M., Maximov, V., Bolegenova, S. Computational modeling of pollutants in furnaces of pulverized coal boilers of the republic of Kazakhstan. // Energy. – 2022. – Vol. 258. – No 124826. – <https://doi.org/10.1016/j.energy.2022.124826>

16 Askarova, A., Safarik, P., Bolegenova, S., Nugymanova, A., Maximov, V., Askarov, N., Bolegenova, S. Using Plasma Activation to Optimize the Combustion Process and Minimize Harmful Emissions. // Chemical Engineering and Technology. – 2021. – Vol. 44, Issue 11. – P. 1970 – 1977.

28.10.25 ж. баспаға түсті.

20.01.26 ж. түзетулерімен түсті.

27.02.26 ж. басып шығаруға қабылданды.

А. С. Аскарова¹, С. А. Болегенова²,

В. Ю. Максимов³, *Д. Д. Тоқтаров⁴

^{1,2,3,4}Қазақский Национальный Университет имени аль-Фараби,

Республика Казахстан, г. Алматы

Поступило в редакцию 28.10.25.

Поступило с исправлениями 20.01.26.

Принято в печать 27.02.26.

ОПТИМИЗАЦИЯ ВЫСОТЫ УСТАНОВКИ ФОРСУНОК ОФА ДЛЯ ЭФФЕКТИВНОГО СЖИГАНИЯ ВЫСОКОЗОЛЬНОГО УГЛЯ

В работе представлены результаты численного исследования процессов ступенчатого сжигания пылеугольного топлива с подачи воздуха над пламенем (OFA-Over-Fire Air) в паровом котле БКЗ-75-39ФБ, работающем на казахстанском высокозольном угле Карагандинского бассейна. Моделирование выполнено в пакете FloREAN с использованием модели турбулентности RANS $k-\epsilon$ и шестипоточной модели. Исследовано пять режимов работы: базовый (без OFA) и четыре варианта с установкой форсунок на высотах 8,0; 9,4; 10,0 и 12,0 м при отношении воздуха в инжекторах и горелочных устройствах 18:82. Постобработка результатов в ParaView позволила получить вертикальные профили и на выходе котла, температур и концентраций газов (CO , CO_2 , NO , NO_2 , SO_2) и провести описательный статистический анализ. Показано, что размещение форсунок OFA на высоте 9,4 м обеспечивает оптимальное соотношение между полнотой сгорания и снижением загрязняющих выбросов: концентрация NO_x ($\text{NO} + \text{NO}_2$) на выходе из топki снижается с 564,34 до 424,22 мг/Нм³, массовая доля CO_2 уменьшается с 0,1562 до 0,1459 кг/кг, при этом CO незначительно возрастает, а температура на выходе падает примерно на 325 °С. Выбросы SO_2 во всех режимах остаются в пределах нормативов Республики Казахстан. Полученные результаты подтверждают, что внедрение технологии OFA с подачей 18 % воздуха в форсунки и высотой установки $\approx 9,4$ м позволяет снизить выбросы NO_x и CO_2 в котлах типа БКЗ-75 без снижения тепловой мощности и может быть рекомендовано для теплоэлектроцентралей Казахстана.

Ключевые слова: CFD-моделирование, котёл БКЗ-75, пылеугольное топливо, технология OFA, снижение NO_x , оптимизация горения, выбросы дымовых газов.

А. С. Аскарова¹, С. А. Болегенова²,

В. Ю. Максимов³, *Д. Д. Тоқтаров⁴

^{1,2,3,4}al-Farabi Kazakh National University,

Republic of Kazakhstan, Almaty.

Received 28.10.25.

Received in revised form 20.01.26.

Accepted for publication 27.02.26.

OPTIMIZATION OF OFA INJECTOR HEIGHT FOR EFFICIENT HIGH-ASH COAL COMBUSTION

The paper presents the results of a numerical study of staged combustion processes of pulverized coal with overfire air (OFA) supply in the BKZ-75-39FB steam boiler operating on high-ash Kazakh coal from the Karaganda Basin. The modeling was carried out in the FloREAN software package using the RANS $k-\epsilon$ turbulence model and a six-stream combustion model. Five operating modes were investigated: a baseline case (without OFA) and four variants with injectors installed at heights of 8.0, 9.4, 10.0, and 12.0 m, with the air distribution ratio between injectors and burners of 18:82. Post-processing of results in ParaView provided vertical and outlet profiles of temperature and gas concentrations (CO , CO_2 , NO , NO_2 , SO_2) and enabled descriptive statistical analysis. It was shown that installing the OFA injectors at 9.4 m provides the optimal balance between complete combustion and pollutant reduction: the NO_x ($\text{NO} + \text{NO}_2$) concentration at the boiler outlet decreases from 564.34 to 424.22 mg/Nm^3 , the CO_2 mass fraction drops from 0.1562 to 0.1459 kg/kg , while CO slightly increases, and the outlet temperature decreases by approximately 325 °C. SO_2 emissions remain within the regulatory limits of the Republic of Kazakhstan under all conditions. The obtained results confirm that implementing the OFA technology with 18 % air supply to injectors and an installation height of about 9.4 m can effectively reduce NO_x and CO_2 emissions in BKZ-75-type boilers without compromising thermal performance and can be recommended for Kazakhstani combined heat and power plants.

Keywords: CFD modeling, BKZ-75 boiler, pulverized coal, OFA technology, NO_x reduction, combustion optimization, flue gas emissions.

SRSTI 28.23.37

<https://doi.org/10.48081/BGQF1941>

***G. F. Aubakirova¹, O.V. Grigorenko², P. A. Petrov³**

A. M. Aytulina⁴, B. K. Bekkozhiba⁵

^{1,3,4,5}Manash Kozybayev North Kazakhstan university,

Republic of Kazakhstan, Petropavlovsk

²Siberian State University of Geosystems and Technologies,
Russia Novosibirsk

¹ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-8636-630X>

²ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-8957-8746>

³ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-6669-5149>

⁴ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-9134-3783>

⁵ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-8945-8477>

*e-mail: gei8778@mail.ru

ANALYSIS OF WHEAT YIELD FACTORS AND PREDICTION USING A NEURAL NETWORK MODEL

The paper presents the development of wheat yield forecasting model in North-Kazakhstan region using artificial neural network. In the course of the study the key predictors of yield were identified, including meteorological indicators (the sum of precipitation during the growing season, average daily air temperature), agrochemical characteristics of soil (moisture at a depth of 0, 1 m, 0, 5 m and 1 m) and phytosanitary conditions. The constructed neural network model based on the back-propagation algorithm with Levenberg–Marquardt optimization demonstrated high forecasting accuracy: on the test subset the root-mean-square error (RMSE) was 3.368, the mean absolute percentage error (MAPE) was 12.02 %, and the coefficient of determination was $R^2 = 0.9831$. These values indicate both low absolute and relative prediction error and stable generalization of the model. The developed system can be used by agrarians to estimate expected yields and optimize resource consumption, as well as integrated into agrometeorological services. Prospects for further development include expansion of the input data set through satellite monitoring and adaptation of the model to changing climatic conditions. The scientific novelty of this study lies in the development and experimental validation of a regional wheat yield forecasting model for the North-Kazakhstan region based on an artificial neural network that simultaneously integrates

agrochemical, meteorological and phytosanitary factors at the level of 13 districts. An optimized three-layer network architecture trained with the Levenberg–Marquardt algorithm is tailored to a multi-year (2008–2017) regional data set, and the resulting model achieves high predictive accuracy ($R^2 = 0.9831$ with low RMSE and MAPE), demonstrating the advantages of the neural-network approach for regional agrometeorological monitoring and yield planning.

Keywords: wheat, yield predictors, artificial neural network, MATLAB, yield forecasting

Introduction

Forecasting crop yields is one of the most important tasks of the agricultural industry, as it allows optimizing resource management and increasing production efficiency. Under the conditions of changing climate and increasing demands for food security, the accuracy of forecasting models becomes especially important. Traditional methods based on statistical models and correlation analysis are not always able to take into account complex non-linear dependencies between weather conditions, soil properties and biological factors [1-4].

The development of artificial intelligence methods, in particular artificial neural networks, opens new opportunities for creating more accurate and adaptive models of yield forecasting. Neural network algorithms are able to identify hidden patterns in data and take into account complex relationships between different parameters [5,6].

This paper considers the development of wheat yield forecasting model for North-Kazakhstan region based on artificial neural network. The main attention is paid to the determination of the most significant factors affecting the yield, construction of the optimal architecture of the model and evaluation of its accuracy in comparison with traditional methods. The results obtained can be useful for agrarians, agricultural enterprises and scientific organizations engaged in monitoring and forecasting of crop yields.

The purpose of the study is to develop and implement a model of wheat yield forecasting in North-Kazakhstan region based on artificial neural network. For this purpose it is necessary to identify the most significant predictors of crop yield, optimize the architecture of neural network and evaluate its accuracy in comparison with traditional forecasting methods. The results obtained will make it possible to create an effective tool for agrarians, providing more accurate forecasting and optimization of agricultural resources use.

Materials and methods

North-Kazakhstan region is one of the leading areas of agricultural production of the Republic of Kazakhstan. The oblast occupies 3.6% of the territory of the Republic, at that it gives 16% of agricultural production or 25% of grain crops harvest. The region is located in the north of the Republic of Kazakhstan, within the southern edge of the West Siberian Plain. The area of the oblast is 98 thousand km², of which agricultural lands occupy 58.8 thousand km², which is 60% of the territory of the oblast [7].

The region includes 13 districts: Kyzylzhar, M. Zhumabaeva and Akkayinsky, G. Musrepova, Ayirtau, Yesilsky, Mamlyutsky, Taiynshinsky, Timiryazevsky, Zhambyl, Akzhar, Shalakynsky and Ualikhanovsky. Data from the above 13 districts of North-Kazakhstan oblast were used to develop the ANN (Figure 1).



Figure 1 – Data from the above 13 districts of North-Kazakhstan oblast were used to develop the ANN

In this study, we hypothesized that wheat yield varies within and between districts depending on environmental factors, soil fertility and moisture, presence of plant diseases, pests and weeds. Functionally, this is expressed as:

$$Y=f(AF, WF, SF) \quad (1)$$

where Y = wheat yield (kg/ha)

AF = soil fertility factors
 WF = meteorological factors
 SF = pest, disease and weed factors.

The study considered a large number of different factors from which 16 input names were selected for each field (Figure 2). A description of the inputs and data preparation is given below [8,9].

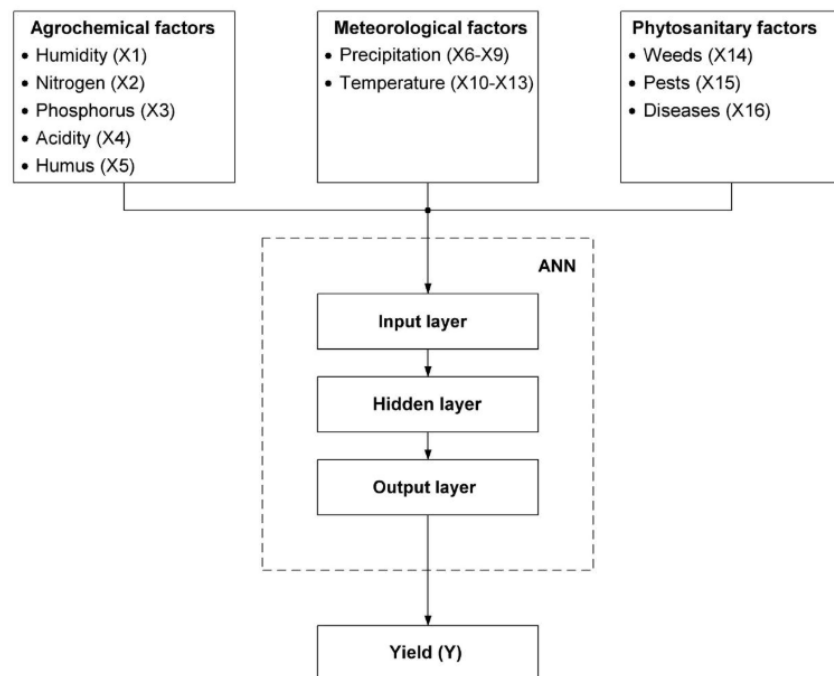


Figure 2 – Information layers used to construct the ANN

The first type of factors is agrochemical. The soil moisture requirements of wheat depend on the stage of development. Wheat ears reach peak water consumption during ear filling, and it is at this time that the plants are more sensitive to drought. During this period, large yield losses can occur on soils with low water-holding capacity [10]. The amount of precipitation and productive moisture reserve in the soil is the main cause of annual yield fluctuations in this study.

For the agrochemical factor, we used the results of measurements made by hydrometeorological stations and posts in order to obtain data on the stock of productive moisture in the 100 cm soil layer as inputs to the ANN.

Four soil fertility factors were also included in the ANN: soil pH, phosphorus, nitrogen, and the percentage of humus in the soil (Table 1). Soil fertility factors were obtained from the analysis of soil samples taken from the fields. The data were obtained for 10 years (from 2008 to 2017). Average values were calculated for further use in the experiment.

The second type of factors is meteorological. Daily climatic observation data (2008-2017) for 29 sites, including precipitation, as well as minimum and maximum air temperature, were obtained from hydrometeorological stations and posts of the Branch of RSE «Kazgidromet» for North-Kazakhstan region.

Precipitation was divided into four periods and mentioned as May, June, July and August.

The third type of factors is phytosanitary. In the north of Kazakhstan huge damage to plants and grain yields of spring wheat is caused by such widespread pests as bread striped flea, cross nestad locust, gray grain moth and others.

In the conditions of modern agricultural economy, weed infestation of fields is not decreasing, but on the contrary, is increasing. The reason for this is the use of no-till technologies, availability of abandoned land, etc. There is a change in the species composition of weeds, which is a consequence of the use of herbicides of the same group. At the moment, almost all crops of grain crops are weedy, and more than half of them are weedy to a medium and strong degree. Particularly high danger of pernicious weeds: thistle, thistle (species), field creeper, wormwood (species). As well as fescue, bristleworts, creeping wheatgrass, white mari, shield, creeping mustard, which is a quarantine weed for many countries importing grain from Kazakhstan.

Root rot, leading to thinning of seedlings, weakening of plants and reduction of their productivity, as well as brown, yellow, stem rust, leaf spot (septorios, helminthosporiosis, etc.) cause great damage to durum wheat crops in northern Kazakhstan.

The data on the number of these pests, diseases and weeds were used as input parameters for the NS, since they significantly affect the damage to wheat yield.

Weed distribution was observed in all fields and is rated from zero (density=0) to very high (density=4).

The output parameter of the ANN was spring wheat yield. Wheat yield data for 2008-2020 were taken from the official website of the Bureau of National Statistics of the Agency for Strategic Planning and Reforms of the Republic of Kazakhstan [7].

The complete data set was randomly split into three mutually exclusive subsets: 70 % of the observations were used for training, 15 % for validation and 15 % for independent testing. Training was performed in MATLAB using the Levenberg–Marquardt back-propagation algorithm. To reduce the risk of overfitting, early stopping based on the validation error was applied: after each epoch the mean squared error (MSE) on the validation subset was monitored, and the network configuration corresponding to the minimum validation error was selected as the final model. The test subset was not used in the training procedure and served only for the final assessment of the generalization ability of the model.

Results and discussion

The algorithm describing the process of setting data for training the neural network is presented in Figure 3.

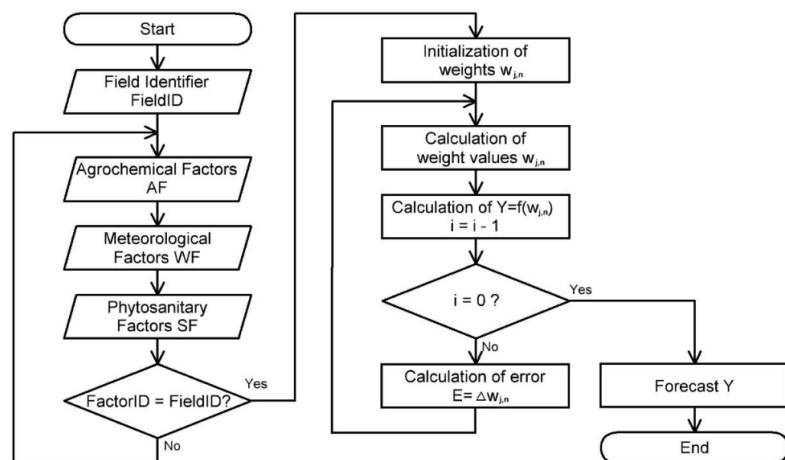


Figure 3 – Algorithm of data assignment for training a neural network for yield forecasting

The block diagram shown in Figure 3 describes the process of yield forecasting based on an artificial neural network that takes into account agrochemical, meteorological and phytosanitary factors.

The first step in training the neural network is to feed the input layer with previously normalized data. The process of data normalization implies transformation of different numerical values of information in one interval. This

type of recording simplifies the training of the neural network. Data normalization is performed by the expression:

$$\hat{Y} = \frac{Y - Y_{min}}{Y_{max} - Y_{min}} \quad (2)$$

where, $\hat{Y}$ – normalized value of data,

Y – actual numerical value of non-normalized data,

Y_{min} – minimum numerical value in the database,

Y_{max} – is the maximum numerical value of the variable in the database.

Next, the neural network randomly determines the initial weight coefficients W_k and determines the neural network error E_k . The value of the next weight coefficient W_{k+1} is selected and then the total error E_{k+1} is calculated. If during the operation of updating the value of the weight coefficient, the total error increases, the weight coefficient is reset to the initial value of the coefficient and increased by a factor of 10. If during the update operation the current total error decreases, the weight coefficient used is retained as the current one and the coefficient and decreases by a factor of 10. It is necessary to repeat the procedure until the current total error reaches a value less than the required value [6,11].

The process starts by obtaining the field ID (FieldID), then agrochemical factors such as soil moisture at 0.1, 0.5 and 1m depth, soil nitrogen and phosphorus content, soil humus content and pH are entered. Next, meteorological factors such as air temperature, and rainfall are considered. After this, phytosanitary factors are considered, which include information on diseases, pests and weeds. In the next step, it is checked whether the data entered correspond to the specific field. If they do not match, a return to the beginning of the process is made to collect the correct data. Next, the weights of the network neurons are initialized and then the weights for each layer of the network are calculated. The network uses the activation function to calculate the output value, which is the predicted yield. The next step checks whether the iterations have reached the last layer of the network. If this condition is not met, an error is calculated which is then used to adjust the weights of the neurons. The process continues until the network completes training. At the end, a yield prediction is generated based on the adjusted weights and the process is completed.

Thus, the neural network goes through the stages of data input, processing and correction, culminating in the calculation of the yield forecast.

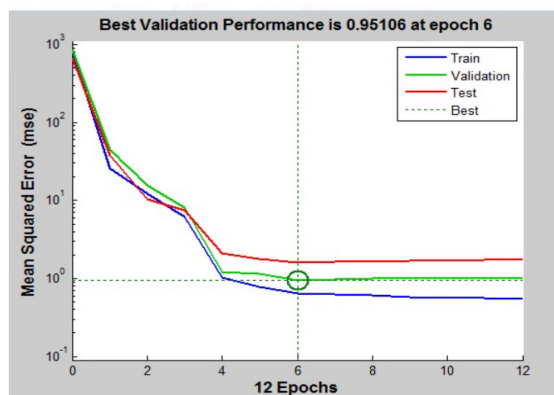


Figure 4 – Dependence of standard deviations on the training interval

To train neural networks we will use the Levenberg-Marquardt algorithm. The considered algorithm is used to determine local optima of the sought parameters of the nonlinear model. The validation of the obtained solution in this Levenberg-Marquardt algorithm is determined based on the determination of RMS errors of the obtained model.

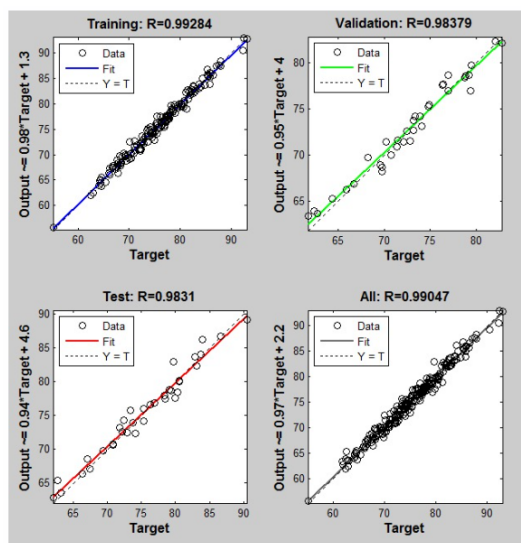


Figure 5 – Results of neural network training

Figure 5 shows four scatter plots illustrating the consistency between predicted values and actual values of the target variable for different stages of the artificial neural network model evaluation. The high value of the correlation coefficient $R=0.99284$ indicates a strong positive linear relationship between predicted and actual values within the training sample. The points are tightly clustered along the $Y=T$ line, indicating the high accuracy of the model during the training phase. Graph representing the results for the validation sample. The correlation coefficient $R=0.98379$ also indicates significant prediction accuracy. The points are placed along the $Y=T$ line, but are slightly more scattered compared to the training sample, indicating a slight drop in consistency. The graph in the lower left corner ($R=0.9831$) demonstrates consistency for the test sample. The correlation coefficient of $R=0.9831$ remains high, indicating good prediction quality on the untrained data. The points in this graph are distributed along the $Y=T$ line with little deviation, showing the stable performance of the model. The graph in the lower right corner ($R=0.99047$) summarizes the results for all data (training, validation, and test samples together). The correlation coefficient $R=0.99047$ confirms the overall high quality of the model. The points are also clustered along the diagonal line, demonstrating the overall consistency of the predicted values with the actual values. Thus, the high values of the correlation coefficients at all stages indicate the successful training of the model and its ability to make accurate predictions, despite the small deviations in the test and validation samples.

In addition to correlation coefficients, several error metrics were calculated to quantitatively assess the predictive performance of the model. For the training subset, the mean absolute percentage error (MAPE) was 8.76 %, and the root-mean-square error (RMSE) was 2.241. For the independent test subset, MAPE was 12.02 % and RMSE was 3.368. These values indicate that the model maintains a relatively low absolute and relative prediction error when moving from the training data to previously unseen test data, which confirms its robustness. The mean absolute error (MAE) showed the same trend as RMSE and MAPE, additionally supporting the high quality of the ANN forecasts and their advantage over a linear regression baseline, which produced larger errors on the test set.

In the present study we focus on point forecasts and aggregate error metrics; a detailed construction and analysis of prediction and confidence intervals for wheat yield forecasts is beyond the scope of this paper and is planned as part of future research.

After training the neural networks, it is necessary to determine the quality of the neural network tuning. One such criterion is the deviation of the value at the output of the neural network from the value from the test data, which corresponds

to the value at the input of the neural network. This indicator can be estimated using histograms of the neural network error distribution.

After training is completed, the network is saved as a code or can be integrated into Simulink for further simulation. Verification of the model is performed on 2021 data and the prediction results are transferred to a statistical analysis program for evaluation. The mean absolute percentage error (MAPE) is used as the main summary indicator of forecast accuracy, which allows adjusting the model parameters if necessary to improve its performance.

Conclusions

In the course of the study the key predictors of wheat yield in North-Kazakhstan region were identified, among which the greatest influence is exerted by the amount of precipitation during the growing season, average daily air temperature, soil moisture at different depths, as well as phytosanitary conditions. An artificial neural network with an optimized three-layer architecture was developed and trained, which allowed achieving high accuracy of forecasting. On the independent test subset the root-mean-square error (RMSE) was 3.368 and the mean absolute percentage error (MAPE) was 12.02 %, while the coefficient of determination was $R^2 = 0.9831$, indicating the high predictive ability of the model. The obtained RMSE and MAPE values confirm that the neural network adequately captures nonlinear relationships between agrochemical, meteorological and phytosanitary predictors and wheat yield and can be reliably used in practical yield forecasting and planning. The developed system can be used by agrarians for resource optimization and integrated into agrometeorological services. In the future, it is planned to expand the set of input data through remote sensing and adapt the model to changing climatic conditions.

References

- 1 Phalan, B., Green, R., & Balmford, A. (2014). Closing yield gaps: perils and possibilities for biodiversity conservation. *Philosophical Transactions of the Royal Society B: Biological Sciences*, 369(1639), 20120285.
- 2 Basso, B., Liu, L. (2019). Seasonal crop yield forecast: methods, applications, and accuracies. *Advances in Agronomy*, 154, 201–255.
- 3 Ben-Ari, T., et al. (2018). Causes and implications of the unforeseen 2016 extreme yield loss in the breadbasket of France. *Nature Communications*, 9(1), 1627.
- 4 Puma, M. J., Bose, S., Chon, S. Y., Cook, B. I. (2015). Assessing the evolving fragility of the global food system. *Environmental Research Letters*, 10(2), 024007.

- 5 Chlingaryan, A., Sukkarieh, S., Whelan, B. (2018). Machine learning approaches for crop yield prediction and nitrogen status estimation in precision agriculture: a review. *Computers and Electronics in Agriculture*, 151, 61–69.
- 6 Goodfellow, I., Bengio, Y., Courville, A. (2016). *Deep Learning*. MIT Press.
- 7 Bureau of National Statistics of the Agency for Strategic Planning and Reforms of the Republic of Kazakhstan. Regional statistical data. https://stat.gov.kz/region/264023/statistical_information/industry/591
- 8 Nandram, B., Berg, E., Barboza, W. (2014). A hierarchical Bayesian model for forecasting state-level corn yield. *Environmental and Ecological Statistics*, 21, 507–530.
- 9 Kadaja, J., Saue, T., Vii, P. (2009). Probabilistic yield forecast based on a production process model. In: Li, D., Zhao, C. (Eds.), *Computer and Computing Technologies in Agriculture II*, Vol. 1. Springer, pp. 487–494.
- 10 Fischer, R. (2015). Definitions and determination of crop yield, yield gaps, and of rates of change. *Field Crops Research*, 182, 9–18.
- 11 Liu, J., Goering, C. E., Tian, L. (2001). Neural network for setting target corn yields. *Transactions of the ASAE*, 44(3), 705–713.

Received 28.02.25.

Received in revised form 04.07.25.

Accepted for publication 27.02.26.

*Г. Ф. Аубакирова¹, О. В. Григоренко²,
П. А. Петров³, А. М. Айтулина⁴, Б. К. Беккожина⁵
^{1,3,4,5}М. Қозыбаев атындағы Солтүстік Қазақстан университеті,
Қазақстан Республикасы, Петропавл қ.;

²Сібір мемлекеттік геожүйелер және технологиялар университеті,
Ресей Федерациясы, Новосибирск қ.
28.02.25 ж. баспаға түсті.
04.07.25 ж. түзетулерімен түсті.
27.02.26 ж. басып шығаруға қабылданды.

БИДАЙ ӨНІМДІЛІГІ ФАКТОРЛАРЫН ТАЛДАУ ЖӘНЕ НЕЙРОНДЫҚ ЖЕЛІ МОДЕЛІ АРҚЫЛЫ БОЛЖАУ

*Жұмыста жасанды нейрондық желіні пайдалана отырып,
Солтүстік Қазақстан облысында бидай өнімділігін болжау
моделін әзірлеу ұсынылған. Зерттеу барысында өнімділіктің негізгі*

болжаушылары анықталды, олардың ішінде метеорологиялық көрсеткіштер (вегетациялық кезеңдегі жауын-шашын мөлшері, ауаның орташа тәуліктік температурасы), топырақтың агрохимиялық сипаттамалары (0,1 м, 0,5 м және 1 м тереңдіктегі ылғалдылық) және фитосанитарлық жағдайлар. Қателерді кері тарату алгоритмі және Левенберг–Марквардт әдісі негізінде құрылған нейрондық желі моделі жоғары болжамдық дәлдікті көрсетті: сынақ таңдамасы үшін түбірлік орта квадраттық қате (RMSE) 3,368, орташа абсолюттік пайыздық қате (MAPE) 12,02 %, ал детерминация коэффициенті $R^2 = 0,9831$ болды. Бұл MAPE, RMSE және R^2 мәндері әзірленген нейрондық желі моделінің болжамдық дәлдігі мен орнықтылығын растайды. Әзірленген жүйені фермерлер күтілетін өнімділікті бағалау және ресурстарды тұтынуды оңтайландыру үшін пайдалана алады және агрометеорологиялық қызметтерге біріктірілген. Әрі қарайғы даму перспективалары спутниктік бақылау арқылы кіріс жиынтығын кеңейтуді және модельді өзгертін климаттық жағдайларға бейімдеуді қамтиды.

Түйін сөздер: қарапайым бидай, өнімділікті болжаушылар, жасанды нейрондық желі, MATLAB, өнімділікті болжау.

*Г. Ф. Аубакирова¹, О.В. Григоренко², П. А. Петров³

А. М. Айтулина⁴, Б. К. Беккожина⁵

^{1,3,4,5}Северо-Казахстанский университет им. М. Козыбаева,

Республика Казахстан, г. Петропавловск

²Сибирский государственный университет геосистем и технологий,

Россия, г. Новосибирск

Поступило в редакцию 28.02.25.

Поступило с исправлениями 04.07.25.

Принято в печать 27.02.26.

АНАЛИЗ ФАКТОРОВ УРОЖАЙНОСТИ ПШЕНИЦЫ И ПРОГНОЗИРОВАНИЕ С ПОМОЩЬЮ НЕЙРОСЕТЕВОЙ МОДЕЛИ

В работе представлена разработка модели прогнозирования урожайности пшеницы в Северо-Казахстанской области с использованием искусственной нейронной сети. В ходе исследования выявлены ключевые предикторы урожайности, среди которых метеорологические показатели (сумма осадков за вегетационный

период, среднесуточная температура воздуха), агрохимические характеристики почвы (влажность на глубине 0,1 м, 0,5 м и 1 м) и фитосанитарные условия. Построенная нейросетевая модель на основе алгоритма обратного распространения ошибки с использованием метода Левенберга–Марквардта показала высокую точность прогнозирования: для тестовой выборки среднеквадратическая ошибка (RMSE) составила 3,368, средняя абсолютная процентная ошибка (MAPE) – 12,02 %, коэффициент детерминации $R^2 = 0,9831$. Полученные значения MAPE, RMSE и R^2 свидетельствуют о высокой точности и устойчивости разработанной нейросетевой модели. Разработанная система может быть использована аграриями для оценки ожидаемой урожайности и оптимизации ресурсопотребления, а также интегрирована в агрометеорологические сервисы. Перспективы дальнейшего развития включают расширение набора входных данных за счет спутникового мониторинга и адаптацию модели к изменяющимся климатическим условиям.

Ключевые слова: пшеница, предикторы урожайности, искусственная нейронная сеть, MATLAB, прогнозирование урожайности.

А. Р. Аханов¹, *О. М. Талипов²^{1,2}Торайғыров университет,

Республика Казахстан, г. Павлодар

¹ORCID: <https://orcid.org/0009-0003-1671-821X>²ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-8355-1769>*e-mail: a_akhanov@mail.ru

СТРУКТУРНО-ПАРАМЕТРИЧЕСКИЙ СИНТЕЗ КОНФИГУРАЦИИ ПРОГРАММНО-АППАРАТНОГО КОМПЛЕКСА НА ОСНОВании СРАВНИТЕЛЬНОЙ ОЦЕНКИ ВАРИАНТОВ ВОЗМОЖНЫХ РЕШЕНИЙ

В статье рассматривается метод структурнопараметрического синтеза конфигурации программноаппаратного комплекса, основанный на сравнительной оценке возможных вариантов реализации. Предложен подход, позволяющий формализовать процесс выбора архитектуры комплекса с учётом многокритериальных показателей эффективности, таких как стоимость разработки и эксплуатации, продолжительность подготовки, а также степень соответствия образовательным целям. Разработана модель оценки, включающая аппаратные и программные компоненты, а также ресурсные характеристики, что обеспечивает комплексный анализ вариантов конфигурации. Экспериментальная часть демонстрирует применение методики для сравнения трёх типов симуляторов, где оптимальным признан интегрированный вариант, сочетающий технологии виртуальной реальности и сенсорные интерфейсы. Полученные результаты подтверждают практическую ценность предложенного подхода для разработки образовательных и тренажёрных систем, а также открывают возможности для дальнейшего совершенствования методов синтеза программноаппаратных комплексов.

Ключевые слова: структурнопараметрический синтез, программноаппаратный комплекс, многокритериальная оценка, система визуализации, виртуальная реальность, образовательные технологии, оптимизация конфигурации.

Введение

Современные программно-аппаратные комплексы (ПАК) становятся всё более сложными и многофункциональными, что связано с ростом требований к качеству визуализации, интерактивности и адаптивности систем. Усложнение архитектуры таких комплексов приводит к необходимости поиска методов оптимизации их конфигурации, позволяющих учитывать разнообразные критерии эффективности и обеспечивать баланс между техническими возможностями, стоимостью и образовательной ценностью.

В последние годы внимание исследователей сосредоточено на разработке подходов к структурно-параметрическому синтезу систем визуализации и тренажёрных комплексов. Так, в работах отечественных авторов рассматриваются методы выбора компонентов ПАК на основе многокритериальной оценки [1, 2], а также вопросы формирования визуального мышления и повышения качества подготовки специалистов с использованием технологий виртуальной и дополненной реальности [3, 4]. При этом остаётся актуальной проблема отсутствия универсальной методики, которая позволяла бы сопоставлять различные варианты конфигурации ПАК и обосновывать выбор оптимального решения.

Цель настоящего исследования заключается в разработке и апробации методики структурно-параметрического синтеза конфигурации программно-аппаратного комплекса на основе сравнительной оценки возможных вариантов. Для достижения поставленной цели решаются следующие задачи:

- формализовать процесс описания и оценки эффективности ПАК;
- разработать модель, учитывающую аппаратные, программные и ресурсные компоненты;
- предложить алгоритм структурно-параметрического синтеза;
- провести сравнительный анализ вариантов конфигурации и определить оптимальное решение.

Материалы и методы

В исследовании использовался программно-аппаратный комплекс (ПАК), предназначенный для реализации образовательных и тренажёрных функций. Материальная база включала [5]:

- аппаратные средства, которые включают в себя мониторы, проекторы, смартфоны, VR/AR/MR-шлемы, сенсорные панели, системы отслеживания движений, VR-платформы, имитаторы специализированных инструментов, а также акустические системы различного уровня;

- программные компоненты, программное обеспечение для визуализации трёхмерных сцен, библиотеки для обработки взаимодействий, средства управления звуковым сопровождением;

- ресурсные показатели: стоимость разработки и эксплуатации, продолжительность подготовки, затраты на обслуживание и ремонт, степень соответствия образовательным целям.

Для анализа применялись данные тестирования фокус-группы пользователей, а также экспертные оценки по набору метрик, отражающих качество визуализации, взаимодействия, перемещения и звукового сопровождения.

Исследование проводилось поэтапно

Анализ процессов функционирования ПАК — выделение ключевых операций, выполняемых обучаемыми при работе с комплексом.

Формирование модели последовательности действий — описание взаимодействия пользователя с системой в виде формализованной модели.

Постановка задачи синтеза — определение критериев эффективности и ограничений, связанных с ресурсами и временем подготовки [6].

Определение структуры системы визуализации — выбор категорий компонентов (отображение, взаимодействие, перемещение, звук).

Выбор параметров компонентов — перебор допустимых вариантов аппаратных и программных средств с учётом их характеристик.

Сравнительная оценка вариантов конфигурации — построение корреляционных матриц и расчёт интегральных показателей по каждой категории метрик.

Экспериментальная проверка — сопоставление трёх вариантов ПАК (физический симулятор, VR-симулятор, интегрированный симулятор) и определение оптимального решения.

Для достижения цели применялись следующие методы:

- многокритериальная оценка — анализ эффективности по совокупности показателей (стоимость, время, качество освоения компетенций);

- метод Парето-оптимальности — выделение множества решений, при которых улучшение одного критерия не приводит к ухудшению других;

- математическое моделирование — построение формализованной модели оценки эффективности ПАК, включающей аппаратные, программные и ресурсные компоненты [7];

- корреляционный анализ — использование матриц для выявления взаимосвязей между компонентами системы и метриками качества;

- экспериментальная апробация — проведение тестирования фокус-группой и сопоставление результатов по различным вариантам конфигурации.

Проблема

Современные программноаппаратные комплексы (ПАК), используемые в образовательных и тренажерных системах, характеризуются высокой степенью сложности и многофункциональности. При проектировании таких комплексов возникает необходимость учитывать широкий спектр критериев эффективности: от стоимости разработки и эксплуатации до качества освоения профессиональных компетенций [1]. Традиционные подходы к выбору конфигурации ПАК часто ограничиваются отдельными показателями и не позволяют получить объективную картину, что снижает обоснованность принимаемых решений.

Научная новизна настоящего исследования заключается в применении многокритериальной оценки для структурнопараметрического синтеза конфигурации ПАК. Такой подход обеспечивает возможность сопоставления различных вариантов архитектуры комплекса и выявления оптимального решения на основе совокупности показателей, включая технические характеристики, ресурсные затраты и образовательную результативность.

Практическая значимость работы определяется её применимостью в разработке симуляторов и тренажёров, используемых в профессиональной подготовке специалистов. Методика позволяет формализовать процесс выбора конфигурации ПАК, что особенно важно для образовательных технологий, военной подготовки и отраслей, где требуется высокая точность моделирования и реалистичность взаимодействия. Таким образом, решение обозначенной проблемы способствует повышению качества обучения и эффективности использования современных программноаппаратных комплексов.

Основная часть

Однако можно сформулировать ряд требований, выполнение которых в какой-то мере устраняет этот произвол и облегчает выбор критерия. Основные из них:

- поскольку критерий предназначен для сравнения, он должен определять некоторый порядок на множестве возможных ситуаций. Если критерий представляется функционалом, то это выполняется автоматически;
- каждый критерий должен иметь четкий физический смысл и отражать целевое предназначение системы;

– если представляется возможность выбора, то нужно стараться, чтоб он был наиболее прост в употреблении. Желательно, чтоб критерий обладал, например, свойством выпуклости и допускал экспериментальную проверку.

При определении эффективности систем связи все показатели выбираются на основе требований к системе и формулируется на языке вероятностей или моментов соответствующих распределений [8].

При наличии нескольких критериев эффективности отыскание степени визуализации, оптимальной по всем критериям одновременно, является неразрешимой в общем случае задачей, так как критерии могут быть несогласованными и улучшение одного из них может быть связано с ухудшением другого. Однако в пространстве управляющих воздействий иногда можно выделить подпространство, в котором все критерии имеют наилучшие значения [3]. Это подпространство в дальнейшем, не рассматривается, как худшее по всем критериям. Если это удастся, то оставшееся пространство управлений будет характеризоваться тем, что улучшение управления по одному критерию всегда связано с ухудшением по каким-то другим. Такое множество управлений называют множеством согласия или множеством Парето.

Таким образом, для выбора оптимальной конфигурации программно-аппаратного комплекса необходимо формализовать процесс профессиональной подготовки на ПАК, разработать модель описания и оценки эффективности, а также алгоритм структурно-параметрического синтеза согласно [4].

Предлагаемая модель оценки эффективности системы визуализации программно-аппаратного комплекса описывается как

$$M_{SV}(TS, P) = \{HW_{SV}, SW_{SV}, R\} \quad (1)$$

где TS – техническая система, процессы которой представлены в ПАК; P – модель последовательности действий обучаемых при функционировании ПАК; $HW_{SV} = \{hm_{svi}\} \in HW$ – множество компонентов аппаратных средств, используемых в системе визуализации ПАК из множества аппаратных средств $SW_{SV} = \{sm_{svi}\} \in SW$; – множество компонентов программного обеспечения, используемых в системе визуализации ПАК из множества программных компонентов SW , $R = \{R_S, R_T, R_E, R_{TT}, R_{QR}\}$ – совокупность ресурсных компонентов оценки системы визуализации ПАК; $R_S = \{R_{Si}\}$, $R_T = \{R_{Ti}\}$, $R_E = \{R_{Ei}\}$, $R_{TT} = \{R_{TTi}\}$, $R_{QR} = \{R_{QRi}\}$ – оценки ресурсных компонентов системы визуализации ПАК: стоимость,

продолжительность разработки, стоимость эксплуатации, продолжительность подготовки, степень соответствия.

Структура системы визуализации определяет набор модулей (программных и аппаратных средств), используемых при реализации

$$S_{SV} \in HW_{SV} \times SW_{SV}, S_{SV} = \{m_k\} \in \{hm_{svi}\} \cup \{sm_{svi}\} \quad (2)$$

При этом структура определяет лишь категории используемых компонентов, например VR-очки, рендер, сенсорный монитор, периферийное оборудование и т.д.

Значение параметров системы визуализации $P_{SV} = \{pm_{svi}\}$ определяют выбор конкретных моделей аппаратных средств $MHW_{SV} = \{mhm_{svi}\}$ и настройки компонентов программного обеспечения $MSW_{SV} = \{msm_{svi}\}$

Каждому конечному компоненту программного обеспечения или компоненту аппаратных средств соответствует оценка, определяющая его характеристики, например, для монитора это будут: разрешение экрана, вес, стоимость, диагональ и т.д.

R_{Sf} – множество характеристик компонента программного обеспечения msm_{svi} , определяющие его характеристики, такие как: язык программирования, объем памяти, используемые библиотеки.

Стоимость разработки программного обеспечения рассчитывается по формуле

$$R_{Ti} = Td_i + Ta_i \quad (3)$$

где sd_i , sa_i – стоимость разработки компонента программного обеспечения и стоимость разработки компонентов взаимосвязи с другими компонентами программного обеспечения и/или периферийными устройствами.

$$R_{Ti} = Td_i + Ta_i \quad (4)$$

где Td_i , Ta_i – продолжительность разработки компонента программного обеспечения и продолжительность разработки компонентов взаимосвязи с другими компонентами программного обеспечения и/или периферийными устройствами.

$$R_{er} = S_{и} + S_{оп} + S_a + S_э + S_p + S_{рм} + S_{нр} \quad (5)$$

где $S_{и}$ – расходы на изготовление, $S_{оп}$ – расходы на обслуживающий персонал, S_a – амортизационные расходы, $S_э$ – эксплуатационные расходы, S_p – расходы на ремонт, $S_{рм}$ – расходы на приобретение расходных материалов, $S_{нр}$ – накладные расходы.

Продолжительность подготовки $R_{ТТi}$ определяется учебной программой подготовки и является величиной эмпирической.

Степень соответствия R_{QRI} i-го зависит как от успешности освоения материала с помощью традиционных методов обучения, так и успешности прохождения задания на аналогичных ПАК.

$$R_{QRI} = \frac{1}{nPnK} \sum_{j=1}^{nP} \sum_{k=1}^{nK} \frac{vp_{jk}(v_i)}{v_{jk}} \quad (6)$$

где $\frac{vp_{jk}(v_i)}{v_{jk}}$ – количество выполненных заданий с учетом компонента

в рамках проверки освоения k-й компетенции, nK – количество проверяемых компетенций.

Таким образом, задачу синтеза программно-аппаратного комплекса можно сформулировать следующим образом, определить такое множество элементов структуры и параметров аппаратных средств и компонентов программного обеспечения, при которых оценки степени визуализации достигают экстремума, а именно: стоимость изготовления, продолжительность разработки, стоимость эксплуатации стремятся к минимуму, а степень освоения к максимуму при выполнении ограничения по продолжительности освоения $R_{ТТ} \leq t_{ТТ}$, где $t_{ТТ}$ – максимально возможное время освоения, определяемое учебной программой.

Адекватность модели заключается в соответствии модели исследуемому объекту, т.е. способностью отображать заданные свойства изучаемого объекта с погрешностью не выше заданной, а также достоверностью примененного метода ее описания (на основе множества Парето).

На основе математической модели оценки эффективности системы визуализации программно-аппаратного комплекса представлена методика структурно-параметрического синтеза, представленная в виде функциональной диаграммы (рисунок 1) и включающая в себя следующие этапы:

- 1 Анализ процессов ПАК.
- 2 Формирование модели последовательности действий обучаемых при функционировании ПАК.
- 3 Постановка задачи структурно-параметрического синтеза системы визуализации.
- 4 Определение набора компонентов системы визуализации.
- 5 Определение оптимальных параметров компонентов системы визуализации путем перебора допустимых вариантов.
- 6 Разработка программно-аппаратного комплекса.



Рисунок 1 – Функциональная диаграмма структурно-параметрического синтеза системы визуализации программно-аппаратного комплекса

Основным этапом является определение оптимальных параметров компонентов системы визуализации, на основе анализа классификации средств и технологий визуализации:

- 1) точность восприятия размеров 3D-объектов;
- 2) точность восприятия расстояний;
- 3) уровень погружения, объемность визуализации;
- 4) работа с высокополигональными сценами;
- 5) возможность высокочастотной отрисовки отображения;
- 6) точность взаимодействия с «крупными» объектами;
- 7) точность взаимодействия с «мелкими» объектами;
- 8) реалистичность взаимодействия;
- 9) точность перемещения;
- 10) реалистичность перемещения;
- 11) точность позиционирования;
- 12) свойства звукоизоляции;
- 13) объемность звучания;
- 14) реалистичность звучания.

Метрики распределены по четырем категориям:

1 Отображение (метрики 1-5) – технические возможности отображения различной графической информации.

2 Взаимодействие (метрики 6-8) – оценка возможности и достоверности взаимодействий с объектами в виртуальном пространстве.

3 Перемещение (метрики 9-11) – уровень возможности перемещения графического представления специалиста (виртуального аватара) в виртуальном пространстве.

4 Звук (метрики 12-14) – качество звукового сопровождения.

Формируются основные категории компонентов СВ, соответствующие категориям метрик, представленным в работе [1]:

1 Отображение – проектор, смартфон, шлем VR, очки AR (дополненной реальности), очки MR (смешанной реальности).

2 Взаимодействие – клавиатура и мышь, «игровые» контроллеры, контроллеры VR/AR/MR, система отслеживания движений, имитатор специализированного инструмента.

3 Перемещение – клавиатура и мышь, «игровые» контроллеры, контроллеры VR/AR/MR, система отслеживания движений, VR-платформы, уникальная система создания физических нагрузок.

4 Звук – одноканальная система, системы объемного звучания, наушники, системы специализированных сигналов (сирены).

Различия между компонентами каждой из категорий путем разработки тренажеров с набором типовых компонентов и их применения для сравнения эффективности реализации различных метрик конкретной категории выявляются по результатам тестирования фокус-группой пользователей [10].

На основе собранных оценок компонентов фокус-группой осуществляется построение корреляционных матриц, где строки соответствуют компонентам СВ, а столбцы – метрикам оценки их качества.

Так как компоненты распределены по четырем категориям в соответствии с группами метрик, то формируются четыре матрицы, каждая из которых иллюстрирует степень применимости компонента (от 0 до 10) по каждой метрике.

Очевидно, что для формирования оптимальной структуры СВ, с учетом требований технического задания к компонентам, необходимо выбирать те, которым соответствуют максимальные оценки.

Корреляционные матрицы [4] представлены в таблицах 1-4

Таблица 1 – Оценки метрик отображения

Метрика	1	2	3	4	5	Итог
Монитор	5	2	8	10	9	6,8
Проектор	6	3	7	10	5	6,2
Смартфон	3	1	5	3	7	3,8
Шлем VR	8	9	10	8	10	9
Очки VR	1	0	2	2	7	2,4
Очки AR	10	10	8	3	6	7,4

Таблица 2 – Оценки метрик взаимодействия

Метрика	6	7	8	Итог
Клавиатура и мышь	4	2	2	2,67
«Игровые» контроллеры	5	3	5	4,33
Контроллеры VR, AR, MR	6	4	6	5,33
Система отслеживания движений	9	8	8	8,33
Имитатор специального инструмента	8	10	10	9,33

Таблица 3 – Оценки метрик перемещения

Метрика	9	10	11	Итог
Клавиатура и мышь	2	1	3	2
«Игровые» контроллеры	3	2	5	3,3
Контроллеры VR, AR, MR	4	3	8	5

Система отслеживания движений	9	10	10	9,67
VR-платформы	8	8	9	8,34
Система создания физических нагрузок	10	10	10	10

Таблица 4 – Оценки метрик звукового сопровождения

Метрика	12	13	14	Итог
Одноканальная система	2	1	3	2
Системы объемного звучания	9	10	9	9,3
Наушники	10	10	8	9,3
Системы специальных сигналов	10	10	10	10

В качестве эксперимента были рассчитаны баллы для 3 вариантов построения программно-аппаратного комплекса (таблица 5):

Вариант А: Физический симулятор (макет).

Вариант Б: Полный VR-симулятор.

Вариант В: Интегрированный симулятор с комбинацией VR и сенсорных экранов.

Таблица 5. – Оценки вариантов построения Программно-аппаратного комплекса

Вариант	А	Б	В
Обобщенная оценка по метрике изображения	1,1	3,8	4,2
Обобщенная оценка по метрике взаимодействия	2,67	5,33	9,33
Обобщенная оценка по метрике перемещения	2	5	9,67
Обобщенная оценка по метрике звукового сопровождения	2	8	10
Итог	1,92	5,53	6,05

По итогу анализа, оптимальный вариант: вариант В – Интегрированный симулятор с комбинацией VR и сенсорных экранов.

Выводы

Разработанная методика структурно-параметрического синтеза программно-аппаратного комплекса позволяет формализовать процесс выбора его конфигурации. Она обеспечивает сопоставление различных

вариантов архитектуры на основе многокритериальной оценки, включающей технические характеристики, ресурсные затраты и образовательную результативность.

Проведенный сравнительный анализ показал, что интегрированный симулятор, сочетающий технологии виртуальной реальности и сенсорные интерфейсы, является оптимальным решением. Такой вариант обеспечивает баланс между реалистичностью визуализации, удобством взаимодействия и экономической целесообразностью.

Практическая значимость исследования заключается в возможности применения предложенной методики при разработке образовательных симуляторов и тренажеров, используемых в профессиональной подготовке специалистов. Это особенно актуально для военной сферы и инженерного образования, где требуется высокая точность моделирования и достоверность взаимодействия.

Перспективы дальнейших исследований связаны с расширением предложенной модели на другие типы симуляторов, а также с интеграцией дополнительных критериев оценки, таких как адаптивность к индивидуальным особенностям обучаемых и возможности масштабирования системы. Это позволит повысить универсальность методики и её применимость в различных областях.

Список использованных источников

1 Щелкунов, Н. Н., Гаврилов, Д. А., Щелкунов, Д. Н. Программноаппаратный комплекс моделирования, анализа и оценки поведения виртуального противника // Научный вестник ОПК России. – 2018. – №2. – С. 73–79.

2 Архипов, А. Е., Карпушкин, С. В. Структурнопараметрический синтез систем визуализации для тренажёрных комплексов // Труды Тамбовского государственного технического университета. – 2022. – Т. 28. – №3. – С. 428–443.

3 Косцова М. В., Пономаренко И.Л., Гришина А. В. Методы формирования визуального мышления у студентов с нарушениями зрения // Учёные записки. Электронный научный журнал Курского государственного университета. – 2020. – №2 (54). – С. 260–265.

4 Трашкова А. В. Выбор способа реализации тренажёрсимулятора для системы трёхмерного моделирования открытых горных работ // Горный информационноаналитический бюллетень. – 2021. – №12. – С. 45–52.

5 **Иванов, И. И.** Структурно-параметрический синтез систем: монография. – Алматы: КазНТУ, 2018. – 250 с.

6 **Петров, П. П., Сидоров, А. А.** Методы сравнительной оценки технических решений. – Москва: Наука, 2015. – 320 с.

7 Ахметов К.К. Сравнительный анализ конфигураций программно-аппаратных комплексов // Вестник КазНУ. Серия техническая. – 2020. – №3(45). – С. 112–120.

8 **Жумабаев, Н. Н.** Многокритериальные методы выбора оптимальных решений // Информационные технологии. – 2019. – №2. – С. 56–63

9 ГОСТ 7.1–2003. Библиографическая запись. Библиографическое описание. Общие требования и правила составления [Электронный ресурс]. – URL: <https://online.zakon.kz> (дата обращения: 10.03.2026).

10 **Смит, Дж., Браун, Т.** Методы сравнительной оценки в проектировании систем [Электронный ресурс] // IEEE Transactions on Systems. – 2021. – Т. 50, №4. – Режим доступа: <https://ieeexplore.ieee.org> (дата обращения: 10.03.2026).

References

1 **Shchelkunov, N. N., Gavrilov, D. A., Shchelkunov, D. N.** Programmno apparatnyy kompleks modelirovaniya, analiza i otsenki povedeniya virtual'nogo protivnika [Software and Hardware Complex for Modeling, Analysis, and Evaluation of Virtual Opponent Behavior] // Nauchnyy vestnik OPK Rossii. – 2018. – №2. – С. 73–79.

2 **Arkhipov, A. E., Karpushkin, S. V.** Strukturno parametricheskiy sintez sistem vizualizatsii dlya trenazhyornykh kompleksov [Structural-Parametric Synthesis of Visualization Systems for Training Complexes] // Trudy Tambovskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta. – 2022. – Т. 28. – №3. – С. 428–443.

3 **Kostsova, M. V., Ponomarenko, I. L., Grishina, A. V.** Metody formirovaniya vizual'nogo myshleniya u studentov s narusheniyami zreniya [Methods of Developing Visual Thinking in Students with Visual Impairments] // Uchenye zapiski. Elektronnyy nauchnyy zhurnal Kurskogo gosudarstvennogo universiteta. – 2020. – №2 (54). – С. 260–265.

4 **Trashkova A. V.** Vybor sposoba realizatsii trenazhyora simulyatora dlya sistemy trekhmernogo modelirovaniya otkrytykh gornykh rabot [Selection of Implementation Method for a Simulator of Three-Dimensional Modeling System of Open-Pit Mining Operations] // Gornyy informatsionno analiticheskiy byulleten'. – 2021. – №12. – С. 45–52.

5 **Ivanov, I. I.** Strukturno-parametricheskiy sintez system [Structural-Parametric Synthesis of Systems]: monografiya. – Almaty: KazNTU, 2018. – 250 s.

6 **Petrov, P. P., Sidorov, A. A.** Metody sravnitel'noy otsenki tekhnicheskikh resheniy [Methods of Comparative Evaluation of Technical Solutions]. – Moskva: Nauka, 2015. – 320 s.

7 **Akhmetov, K. K.** Sravnitel'nyy analiz konfiguratsiy programmno-apparatnykh kompleksov [Comparative Analysis of Configurations of Software and Hardware Complexes] // Vestnik KazNU. Seriya tekhnicheskaya. – 2020. – №3(45). – S. 112–120.

8 **Zhumabayev, N. N.** Mnogokriterial'nye metody vybora optimal'nykh resheniy [Multi-Criteria Methods for Selecting Optimal Solutions] // Informatsionnye tekhnologii. – 2019. – №2. – S. 56–63.

9 GOST 7.1–2003. Bibliograficheskaya zapis'. Bibliograficheskoe opisanie. Obshchie trebovaniya i pravila sostavleniya [Bibliographic Record. Bibliographic Description. General Requirements and Rules for Compilation] [Elektronnyy resurs]. – URL: <https://online.zakon.kz> (data obrashcheniya: 10.03.2026).

10 **Smith J., Brown T.** Metody sravnitel'noy otsenki v proektirovani sistem [Elektronnyy resurs] [Comparative Evaluation Methods in System Design] // IEEE Transactions on Systems. – 2021. – Т. 50, №4. – Rezhim dostupa: <https://ieeexplore.ieee.org> (data obrashcheniya: 10.03.2026).

Поступило в редакцию 10.03.26.

Поступило с исправлениями 15.03.26.

Принято в печать 13.03.26.

*А. Р. Аханов¹, *О. М. Талипов²*

^{1,2}Торайғыров университет,

Қазақстан Республикасы, Павлодар қ.

10.03.26 ж. баспаға түсті.

15.03.26 ж. түзетулерімен түсті.

13.03.26 ж. басып шығаруға қабылданды.

СТРУКТУРАЛЫҚ-ПАРАМЕТРЛІК СИНТЕЗ: БАҒДАРЛАМАЛЫҚ-АППАРАТТЫҚ КОМПЛЕКТІҢ КОНФИГУРАЦИЯСЫН ЫҚТИМАЛ ШЕШІМДЕРДІ САЛЫСТЫРМАЛЫ БАҒАЛАУ НЕГІЗІНДЕ ҚҰРУ

Мақалада бағдарламалық-аппараттық кешеннің конфигурациясын құрылымдық-параметрлік синтездеу әдісі қарастырылады. Ұсынылған

тәсіл кешен архитектурасын таңдауды формализациялауға мүмкіндік береді және тиімділіктің көпкритерийлі көрсеткіштерін ескереді: әзірлеу мен пайдаланудың құны, дайындық ұзақтығы, сондайақ білім беру мақсаттарына сәйкестік деңгейі. Бағалау моделі аппараттық және бағдарламалық компоненттерді, сондайақ ресурстық сипаттамаларды қамтиды, бұл конфигурация нұсқаларын кешенді талдауға жағдай жасайды. Эксперименттік бөлімде үш түрлі симуляторды салыстыру нәтижелері ұсынылған, олардың ішінде виртуалды шындық технологиялары мен сенсорлық интерфейстерді біріктіретін интеграцияланған нұсқа ең тиімді деп танылды. Алынған нәтижелер ұсынылған әдістің білім беру және тренажерлік жүйелерді әзірлеудегі практикалық құндылығын дәлелдейді және бағдарламалық аппараттық кешендерді синтездеу әдістерін одан әрі жетілдіруге мүмкіндік береді.

Кілтті сөздер: құрылымдық параметрлік синтез, бағдарламалық аппараттық кешен, көпкритерийлі бағалау, визуализация жүйесі, виртуалды шындық, білім беру технологиялары, конфигурацияны оңтайландыру.

A. R. Akhanov, *O. M. Talipov

1,2Toraighyrov University, Republic of Kazakhstan, Pavlodar

Received 10.03.26.

Received in revised form 15.03.26.

Accepted for publication 13.03.26.

STRUCTURALPARAMETRIC SYNTHESIS OF THE CONFIGURATION OF A HARDWARE–SOFTWARE COMPLEX BASED ON COMPARATIVE EVALUATION OF POSSIBLE SOLUTIONS

The article examines a method of structuralparametric synthesis of a hardware–software complex configuration, based on comparative evaluation of possible implementation options. The proposed approach enables the formalization of architecture selection while considering multiple efficiency criteria, such as development and operational costs, training duration, and compliance with educational objectives. The evaluation model incorporates hardware and software components as well as resource characteristics, ensuring a comprehensive analysis

of configuration alternatives. The experimental part demonstrates the application of the methodology to compare three types of simulators, with the integrated variant—combining virtual reality technologies and touch interfaces—recognized as the most effective. The results confirm the practical value of the proposed approach for the development of educational and training systems and highlight opportunities for further improvement of hardware–software synthesis methods.

Keywords: structuralparametric synthesis, hardware–software complex, multicriteria evaluation, visualization system, virtual reality, educational technologies, configuration optimization.

**Ж. Е. Байжұма¹, Н. Б. Қаласов²,
*А. Ғ. Сабырова³, Г. М. Молдашева⁴**

^{1,2,3,4}әл-Фараби атындағы Қазақ Ұлттық Университеті,
Қазақстан Республикасы, Алматы қ.

¹ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-3692-2245>

²ORCID: <https://orcid.org/0009-0002-0015-8433>

³ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-3709-5544>

⁴ORCID: <https://orcid.org/0009-0005-4232-733X>

*e-mail: sabyrova_ako@mail.ru

ЖЕЛ ТУРБИНАСЫ ҚАЛАҚШАЛАРЫНЫҢ АЭРОДИНАМИКАСЫН ХАЛЫҚАРАЛЫҚ СТАНДАРТ ТАЛАПТАРЫНА СӘЙКЕСТІГІН БАҒАЛАУДЫҢ САНДЫҚ ӘДІСІ

Қазіргі таңда баламалы энергия көздерін дамыту – экологиялық қауіпсіздік пен энергетикалық тұрақтылыққа қол жеткізудің маңызды жолы болып табылады. Соның ішінде жел энергетикасы сарқылмайтын, қоршаған ортаға зиянсыз және кеңінен қолжетімді энергия көзі ретінде ерекше маңызға ие. Алайда жел турбиналарының тиімді жұмыс істеуі олардың басты элементтерінің бірі – қалақшалардың аэродинамикалық сипаттамаларына тікелей байланысты.

Қалақшалар көбіне тозуға, механикалық зақымдануға және климаттық факторлардың әсеріне ұшырайды. Бұл мәселе, әсіресе, климаттық жағдайлары күрделі Қазақстанның кейбір аймақтарында аса өзекті болып отыр. Сондықтан қалақша конструкциясының тиімділігі мен халықаралық стандарттарға сәйкестігін бағалау – маңызды ғылыми әрі өндірістік міндет. Сонымен қатар, жоғары дәлдіктегі модельдеу әдістерін қолдану арқылы қалақша жұмысының түрлі жағдайлардағы мінез-құлқын болжауға болады. Бұл жел турбиналарын жобалау кезінде қауіпсіздік пен өнімділікті арттыруға мүмкіндік береді. Зерттеу нәтижелері

болашақта отандық өндірістегі жел турбиналарының сапасын жақсартуға негіз бола алады.

Осы зерттеуде сандық модельдеу әдісі қолданылып, қалақшаның аэродинамикалық сипаттамалары бағаланды. Зерттеу нәтижелері қалақшаның тиімділігі халықаралық стандарттарға сай келетінін көрсетті. Ал анықталған кейбір ерекшеліктер жобалауды одан әрі жетілдіруге негіз бола алады. Жұмыс жел энергетикасын дамытуға өз үлесін қосады.

Кілтті сөздер: жел генераторы, қалақша, халықаралық стандарттар, аэродинамика, модельдеу әдістері.

Кіріспе

Бүгінде жел энергетикасы әлемдік энергетикалық саланың басты бағыттарының бірі ретінде қарқынды дамуда. Ал жел турбиналарының жұмыс тиімділігі мен сенімділігі көбіне олардың қалақшаларының аэродинамикалық сипаттамаларымен айқындалады. [1]. Қазіргі экологиялық және энергетикалық мәселелерге байланысты жел энергиясы соңғы онжылдықтарда тегін әрі жаңартылатын энергия көзі ретінде кең көлемде зерттеліп келеді. Желден энергия алу мақсатында әртүрлі машиналар мен құрылғылардың бірнеше прототиптері жасалып, сынақтан өткізілді. Осы құрылғылардың ішінде жел турбиналары жел энергиясын пайдалануға арналған аса тартымды қондырғылар ретінде кеңінен танылған [2, 3].

Жел турбинасы қалақшаларының аэродинамикалық сипаттамаларын халықаралық стандарттар талаптарына сәйкестік тұрғысынан тиімді бағалау үшін қалақшалардың жұмыс ерекшеліктеріне әсер ететін бірқатар факторларды ескеру қажет. Оларға қалақ геометриясы, жел жылдамдығы, шабуыл бұрышы, айналу жиілігі сияқты аэродинамикалық және кинематикалық параметрлер жатады. Бұл факторлар қалақшалардың қозғалыс динамикасына және ауа ағынымен өзара әрекеттесуіне тікелей ықпал етеді. Осындай күрделі процестерді түсіну мен болжау мақсатында жел турбинасының қалақшаларын сандық модельдеу әдістерін қолдану ерекше маңызға ие.

Сандық модельдеудің артықшылығы – нақты эксперимент жүргізу қиын немесе мүмкін емес жағдайларда да әртүрлі жұмыс режимдерінде жүйенің мінез-құлқын алдын ала бағалауға мүмкіндік беруі. Бұл тәсіл зерттеу үдерісін едәуір жеделдетіп, материалдық және уақыттық шығындарды азайтады. Сонымен қатар, сандық модельдеу нәтижелері арқылы

қалақшалар геометриясының стандарттарға сәйкестігі жан-жақты талданып, конструктивтік және функционалдық жетілдірулерге негіз бола алады.

Осы зерттеуде қалақшалардың аэродинамикалық қасиеттері сандық әдістер арқылы зерттеліп, олардың халықаралық стандарттарға сәйкестігі бағаланады. Бұл тәсіл жел энергетикасы саласындағы жобалаудың тиімділігін арттырып қана қоймай, құрылғылардың сенімділігін де жоғарылатуға мүмкіндік береді.

Материалдар мен әдістері

Эксперименттік әдістер нақты әрі жоғары дәлдікті деректер береді, бірақ олардың жүргізілуі уақыт пен ресурстарды көп қажет етеді. Осыған байланысты қазіргі таңда сандық модельдеу әдістері, әсіресе CFD технологиялары, жел турбинасы қалақшаларының аэродинамикасын зерттеуде кеңінен қолданыс табуда [3]. CFD әдістері ағынның жылдамдық өрістерін, қысымның таралуын, көтеру және кедергі күштерін, сондай-ақ құйындардың пайда болуын егжей-тегжейлі талдауға мүмкіндік береді [4]. Бұл әдістердің басты артықшылығы – геометриялық параметрлерді, ағын шарттарын және жұмыс режимдерін оңай өзгерту арқылы көптеген нұсқаларды салыстырмалы түрде қысқа уақытта зерттеу мүмкіндігі.

Сонымен қатар, CFD модельдеулерінің дәлдігі таңдалған турбуленттілік модельдеріне, тордың сапасына және шекаралық шарттардың дұрыс берілуіне тікелей тәуелді [5]. Сондықтан сандық есептеулердің нәтижелерін эксперименттік деректермен салыстырып, валидациялау маңызды болып табылады. Инженерлік тәжірибеде жиі қолданылатын жартылай эмпирикалық әдістер (мысалы, қалақша элементтері импульс теориясы – BEM) есептеу тұрғысынан қарапайым әрі жылдам болғанымен, күрделі ағындық құбылыстарды, соның ішінде үшөлшемді әсерлер мен ағынның ажырауын дәл сипаттай алмайды [6, 7].

Осылайша, жел турбинасы қалақшаларының аэродинамикалық қасиеттерін жан-жақты және сенімді зерттеу үшін эксперименттік, сандық және инженерлік әдістерді кешенді түрде қолдану тиімді болып саналады. Мұндай үйлесімді тәсіл алынған нәтижелердің дәлдігін арттырып қана қоймай, жел энергетикалық қондырғылардың тиімділігі мен сенімділігін оңтайландыруға мүмкіндік береді.

Қалақша айналасындағы ауа ағынының сипатын терең түсіну жел турбинасының аэродинамикалық тиімділігіне, энергия өндіру қабілетіне және құрылымдық сенімділігіне тікелей әсер етеді. Осы себепті ағын режимін анықтайтын Рейнольдс санын талдау және қозғалыстағы сұйықтықты сипаттайтын Навье–Стокс теңдеулерін қолдану ерекше маңызға ие.

Бұл теориялық негіздер аэродинамикалық құбылыстарды толық әрі дәл сипаттауға мүмкіндік береді [8].

Осы физикалық негіздерге сүйене отырып, жел турбинасы қалақшаларының аэродинамикалық сипаттамаларын сандық тұрғыдан бағалау үшін көтеру коэффициенті (Cl) мен кедергі коэффициенті (Cd) кеңінен қолданылады. Бұл коэффициенттер аэродинамикалық күштердің тиімділігі мен аэротүйісу әсерін сипаттай отырып, қалақтың пішінін оңтайландыру мен жұмыс режимдерін талдауға мүмкіндік береді.

Көтеру коэффициенті (Cl) мен кедергі коэффициенті (Cd) — аэродинамикадағы негізгі сипаттамалар. Олар қалақшаға әсер ететін аэродинамикалық күштерді сипаттайды [9].

Көтеру коэффициенті (Cl):

$$C_l = \frac{L}{\frac{1}{2}\rho V^2 A} \quad (1)$$

Кедергі коэффициенті (Cd):

$$C_d = \frac{D}{\frac{1}{2}\rho V^2 A} \quad (2)$$

Модельдеу бағдарламалық жасақтамасы

Жел энергетикасы саласындағы зерттеулерді жүргізу үшін нақты әрі сенімді эталон ретінде қабылданған турбиналық модельдер қажет. Осы бағытта АҚШ-тың Ұлттық жаңартылатын энергия зертханасы (NREL) әзірлеген 5 МВт қуаттылығындағы эталонды турбина кеңінен қолданылады. Бұл модель аэродинамикалық сипаттамаларды бағалау, конструкцияны жетілдіру және әртүрлі сандық модельдерді тексеру үшін өте тиімді. NREL 5-МВт турбинасы — көлденең осьті, үш қалақшалы жел турбинасы [10]. Бұл модель сандық зерттеулер үшін ашық бастапқы деректерге ие және халықаралық зерттеушілер қауымдастығы арасында кеңінен қолданылады. Бұл турбина FAST, OpenFAST, ANSYS Fluent сияқты бағдарламаларда модельдеуге ыңғайлы. Оның геометриясы мен аэродинамикалық параметрлері ашық түрде жарияланғандықтан, сандық симуляция нәтижелерін эталон ретінде салыстыруға мүмкіндік береді.

Жел турбинасының қалақшалары аэродинамикалық күштер, діріл, материалдардың шаршауы және әртүрлі механикалық жүктемелер сияқты күрделі әсерлерге ұшырайды, сондықтан оларды зерттеу үшін толыққанды сандық модельдер қажет.

ANSYS бағдарламасы ауа ағыны мен турбина құрылымының өзара әрекеттесуін, сондай-ақ қалақша материалдарының механикалық және физикалық қасиеттерін есепке ала отырып, мұндай модельдерді жасауға мүмкіндік береді. Бұл бағдарлама күрделі CAD-модельдерді әзірлеуге, олардың сызықтық емес деформацияларын, кернеу және шаршау жағдайларын талдауға қолайлы, нәтижесінде турбинаның беріктілігі мен сенімділігін қамтамасыз етеді [11]. Сандық талдаудың нәтижесінде жел жылдамдығы мен қысым өрістері, сондай-ақ қалақшаға әсер ететін аэродинамикалық күштер мен моменттер анықталып, контурлық карталар арқылы визуализацияланады.

Сонымен қатар, модельдер халықаралық IEC 61400 стандарттарына сәйкес әзірленіп, турбинаның қауіпсіздігі мен тиімділігін жаһандық талаптарға толық сәйкестендіреді [12].

Нәтижелер және талқылау

Бұл зерттеуде салыстыру үшін NREL 5 MWt қуатындағы жел турбинасы қалақшасының моделі қолданылды, оның аэродинамикалық және конструкциялық сипаттамалары егжей-тегжейлі құжатталған және IEC 61400 халықаралық стандартының талаптарына толық сәйкес келеді. Сол себепті бұл модель жел турбинасы қалақшаларының аэродинамикалық өнімділігін бағалауда халықаралық деңгейде мойындалған сенімді эталон болып табылады.

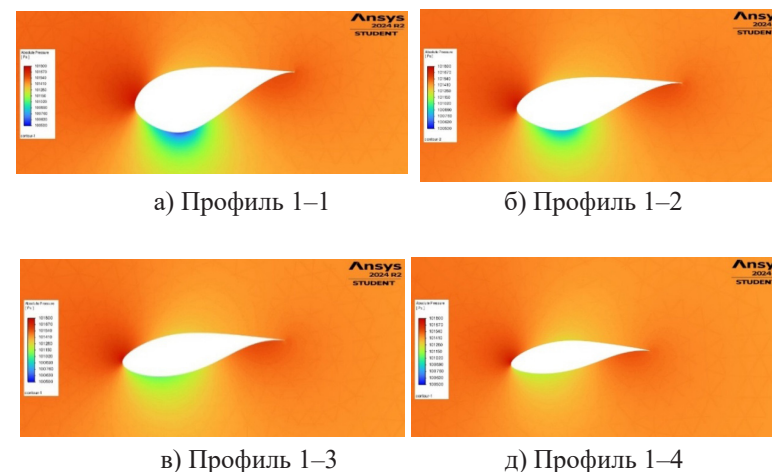
NREL 5 MWt моделі нақты жұмыс параметрлерінің дәлдігімен және конструкциялық деректерінің толықтығымен ерекшеленеді, сондықтан ол ғылыми-зерттеу және инженерлік жобалау саласында стандарттық модель ретінде кеңінен қолданылады. Жел турбинасы қалақшаларын математикалық модельдеу турбинаның тиімділігі мен сенімділігін қамтамасыз етудегі маңызды кезеңдердің бірі болып табылады. Мұндай модельдеуде қалақшаның геометриялық пішіні, шабуыл бұрышы, ұзындығы, хорда өлшемі және басқа да аэродинамикалық параметрлерді дәл есепке алу оның аэродинамикалық мінез-құлқын болжауға және турбина жұмысының жалпы тиімділігін арттыруға мүмкіндік береді [13].

Pointwise бағдарламасында жасалған аэродинамикалық профиль торлары профиль айналасындағы ауа ағынын дәл талдау мен модельдеуге арналған. Торлар біркелкі құрылымдалған, тұрақты және сапалы ұяшықтардан тұрады, бұл сандық есептеулердің сенімділігін айтарлықтай арттырады. Мұндай торлар негізгі аэродинамикалық параметрлерді, оның ішінде көтеру және кедергі коэффициенттерін анықтауға мүмкіндік береді. Сонымен қатар, профиль бетіне жақын аймақтағы қысым мен ауа жылдамдығының таралуын егжей-тегжейлі зерттеуге болады.

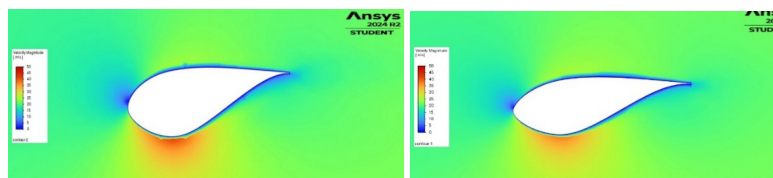
Суреттерде жылдамдық пен қысымның таралуын визуалды түрде көруге болады, бұл ағынның профиль айналасындағы мінез-құлқын түсінуге көмектеседі. Ауа ағынының профильмен өзара әрекеттесуі қысымның таралуына тікелей әсер етеді, бұл профильдің аэродинамикалық қасиеттерін анықтайды. Алдыңғы жиегінде ауа ағыны қысылып, баяулайтындықтан, статикалық қысым айтарлықтай артады, бұл қызыл түспен көрсетілген.

Профильдің жоғарғы бетінде ауа ағыны жылдамдап, қысым төмендейді, бұл қызғылт сарыдан ашық реңктерге ауысу арқылы көрінеді. Бернулли принципіне сәйкес, ағынның жылдамдығы артқан сайын статикалық қысым азаяды. Қысымның ең төмен мәні профильдің ең қисық жерінде байқалады, бұл көтеру күшінің негізгі үлесін қалыптастырады. Төменгі бетінде ауа баяу қозғалады, қысым жоғары болады, бұл жасылдан көкке дейінгі түстермен көрінеді. Жоғарыдан төменге қарай қысым градиенті профильдің көтеру күшін құруға әсер етеді. Артқы жиекте жоғарғы және төменгі беттердегі ағындар біріктіріледі. Қалған қысым градиенті құйындардың пайда болуына және профиль артындағы турбулентті ағындардың қалыптасуына әкеледі.

Осылайша, Pointwise бағдарламасында жасалған торлар аэродинамикалық процестерді жан-жақты және дәл модельдеуге мүмкіндік береді.

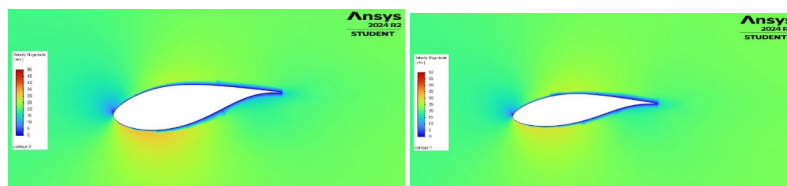


1.1-сурет– Профильдер айналасындағы жел ағыны а) Профиль 1–1, б) Профиль 1–2, в) Профиль 1–3, д) Профиль 1–4
Параметр: Қысым



а) Профиль 1–1

б) Профиль 1–2



в) Профиль 1–3

д) Профиль 1–4

1.2-сурет – Профильдер айналасындағы жел ағыны а) Профиль 1–1,

б) Профиль 1–2, в) Профиль 1–3, д) Профиль 1–4

Параметр: Жылдамдық

Ағынның жылдамдығы түстік градация арқылы көрсетілген: көк және көгілдір реңктер төмен жылдамдық аймақтарын (0–10 м/с), жасыл реңктер орташа жылдамдықты (15–25 м/с), ал сарыдан қызылға дейінгі түстер жоғары жылдамдықты аймақтарды (30–50+ м/с) бейнелейді.

Профильдердің алдыңғы жиегінде ағынның тоқтау нүктесі байқалады. Бұл жерде жылдамдық шамамен нөлге тең болып, сәйкесінше статикалық қысым максималды мәнге жетеді. Бұл құбылыс ағынның профильге тікелей соқтығысуы нәтижесінде орын алады.

Жоғарғы беті бойымен ағын едәуір жеделдейді. Бұл жерлерде жылдамдықтың артуы Бернулли принципіне сәйкес қысымның айтарлықтай төмендеуіне әкеледі. Ең жоғары жылдамдық профильдің жоғарғы қисық бөлігінде байқалады және дәл осы аймақ көтеру күшінің басым бөлігін қалыптастырады.

Төменгі бетінде, керісінше, ағын баяу қозғалады, бұл жерлерде қысым жоғарырақ сақталады. Осылайша, жоғарғы және төменгі беттер арасында айқын жылдамдық градиенті қалыптасады. Бұл градиент көтеру күшінің пайда болуына және қалақшаның тиімділігіне тікелей әсер етеді.

Артқы жиегінде жоғарғы және төменгі беттерден шыққан ағындар қайта қосылады. Бұл аймақта жылдамдықтың аздап өзгеруі мүмкін, ал қолайсыз

жағдайларда құйындардың пайда болуы да ықтимал, бұл турбуленттілікке және энергия шығындарына әкеледі.

Жалпы алғанда, алынған нәтижелер жел турбины қалақшасының аэродинамикалық сипаттамаларын бағалауда маңызды. Ағынның жылдамдық бөлінуі мен қысым градиенттері көтеру және кедергі күштерін есептеуге, сондай-ақ қалақшаның пішінін оңтайландыруға негіз бола алады.

1-кесте – атқылау бұрышына байланысты көтеру және қарсылық коэффициенттерінің мәндері, а) 1-1 профилінің эталондық мәндері, б) ANSYS бағдарламасында жасалған сандық модельдеу нәтижелері.

Атқылау бұрышы	Cl	Cd	Атқылау бұрышы	Cl	Cd
0	0,434	0,0061	0	0,46	0,0064
1	0,568	0,0064	1	0,58	0,0061
2	0,699	0,0068	2	0,682	0,006
3	0,818	0,0069	3	0,813	0,007
4	0,949	0,007	4	0,933	0,0071
5	1,063	0,0078	5	1,047	0,0075
6	1,159	0,0122	6	1,139	0,0108
7	1,257	0,013	7	1,241	0,0129
8	1,332	0,0155	8	1,327	0,0146
9	1,412	0,0183	9	1,389	0,018
10	1,433	0,0262	10	1,437	0,0256
11	1,379	0,0261	11	1,363	0,0412
12	1,275	0,0611	12	1,269	0,058
13	1,239	0,078	13	1,242	0,074
14	1,259	0,114	14	1,251	0,091
16	1,275	0,1213	16	1,265	0,119
17	1,282	0,1434	17	1,261	0,1384
18	1,31	0,165	18	1,294	0,1581
19	1,312	0,1846	19	1,315	0,178
20	1,333	0,206	20	1,313	0,1921

21	1,359	0,2281	21	1,346	0,223
22	1,364	0,2531	22	1,351	0,241
23	1,325	0,281	23	1,314	0,2708
24	1,28	0,301	24	1,281	0,2981
25	1,251	0,339	25	1,247	0,3254
26	1,219	0,3673	26	1,21	0,3523
28	1,187	0,3974	28	1,165	0,3791

а)

б)

Осы мәліметтер негізінде модельдеу барысында алынған мәліметтерді эталондық мәліметтермен салыстырамыз (Сурет – 2):



а) Параметр: көтеру коэффициенті C_l



б) Параметр: қарсылық күшінің коэффициенті C_d
2-сурет – 1-2 профілі үшін C_l және C_d атқылау бұрышының тәуелділігі

2-кесте – атқылау бұрышына байланысты көтеру және қарсылық коэффициенттерінің мәндері, а) 1-2 профілінің эталондық мәндері, б) ANSYS бағдарламасында жасалған сандық модельдеу нәтижелері.

Атқылау бұрышы	C_l	C_d	Атқылау бұрышы	C_l	C_d
0	0,399	0,0059	0	0,41	0,0065
1	0,548	0,0061	1	0,544	0,0069
2	0,677	0,0065	2	0,68	0,007
3	0,814	0,007	3	0,811	0,0071
4	0,933	0,0071	4	0,938	0,0072
5	1,055	0,0075	5	1,059	0,0079
6	1,149	0,012	6	1,15	0,0125
7	1,247	0,0132	7	1,251	0,0124
8	1,329	0,0158	8	1,329	0,0161
9	1,402	0,0179	9	1,41	0,0175
10	1,422	0,0261	10	1,424	0,0263
11	1,369	0,0359	11	1,377	0,0339
12	1,269	0,0599	12	1,272	0,0601

13	1,235	0,075	13	1,233	0,0721
14	1,248	0,115	14	1,241	0,1048
16	1,267	0,125	16	1,268	0,129
17	1,278	0,148	17	1,272	0,1486
18	1,311	0,1634	18	1,313	0,1635
19	1,3	0,1844	19	1,315	0,1851
20	1,31	0,211	20	1,312	0,2113
21	1,344	0,2199	21	1,344	0,2195
22	1,362	0,2532	22	1,369	0,2335
23	1,312	0,2789	23	1,314	0,2793
24	1,3	0,3123	24	1,311	0,2928
25	1,258	0,3342	25	1,259	0,3146
26	1,222	0,358	26	1,225	0,3482
28	1,169	0,3981	28	1,174	0,3684
30	1,12	0,4498	30	1,122	0,415

а) б)

Кесте 2-де берілген мәліметтерге сүйене отырып, модель NREL базасындағы эталондық мәндермен салыстырылып, оның дұрыстығы тексеріледі:



а) Параметр: көтеру коэффициенті C_l



б) Параметр: қарсылық күшінің коэффициенті C_d
3-сурет – 1-2 профилі үшін C_l және C_d атқылау бұрышының тәуелділігі

Кесте-3-те 1–3 аэродинамикалық профилі модельдеу нәтижелері көрсетілген:

3-кесте – атқылау бұрышына байланысты көтеру және қарсылық коэффициенттерінің мәндері: 1-3 профилінің эталондық мәндері, б) ANSYS бағдарламасында жасалған сандық модельдеу нәтижелері.

Атқылау бұрышы	C_l	C_d	Атқылау бұрышы	C_l	C_d
0	0,19	0,0091	0	0,185	0,009
1	0,325	0,0096	1	0,32	0,0095
2	0,46	0,0099	2	0,455	0,0098
3	0,595	0,0102	3	0,585	0,0101
4	0,725	0,0104	4	0,715	0,0103
5	0,86	0,0107	5	0,845	0,0106
6	0,99	0,011	6	0,975	0,0109
7	1,115	0,0114	7	1,1	0,0113
8	1,24	0,0119	8	1,225	0,0118
9	1,345	0,0131	9	1,33	0,013
10	1,45	0,0152	10	1,435	0,015

11	1,54	0,019	11	1,52	0,0185
12	1,61	0,026	12	1,595	0,025
13	1,665	0,038	13	1,65	0,0365
14	1,69	0,06	14	1,675	0,057
15	1,68	0,079	15	1,666	0,077
16	1,62	0,132	16	1,605	0,128
17	1,57	0,176	17	1,555	0,17
18	1,53	0,225	18	1,515	0,22
19	1,505	0,265	19	1,485	0,26
20	1,52	0,295	20	1,5	0,29
21	1,52	0,33	21	1,5	0,325
22	1,515	0,365	22	1,495	0,36
23	1,51	0,405	23	1,49	0,4
24	1,505	0,44	24	1,485	0,435
25	1,495	0,48	25	1,475	0,47
26	1,485	0,4784	26	1,465	0,51
28	1,32	0,4998	28	1,42	0,5145
30	1,08	0,5213	30	1,112	0,4914

а)

б)

Басқа профильдер сияқты эталондық мәндер қолдананылып модель валидациясы жасалды (Сурет 4).

а) Параметр: көтеру коэффициенті C_l 

б) Параметр: қарсылық күшінің коэффициенті C_d
4-сурет – 1-3 профилі үшін C_l және C_d атқылау бұрышының тәуелділігі

4-кесте – атқылау бұрышына байланысты көтеру және қарсылық коэффициенттерінің мәндері: 1-4 профилінің эталондық мәндері, б) ANSYS бағдарламасында жасалған сандық модельдеу нәтижелері.

Атқылау бұрышы	C_l	C_d	Атқылау бұрышы	C_l	C_d
0	0,525	0,0055	0	0,505	0,0055
1	0,623	0,0056	1	0,625	0,0056
2	0,747	0,0058	2	0,748	0,0057
3	0,864	0,0062	3	0,865	0,006
4	0,971	0,007	4	0,975	0,0068
5	1,061	0,0088	5	1,074	0,0085
6	1,1941	0,011	6	1,25	0,0106
7	1,221	0,0128	7	1,215	0,0124
8	1,312	0,0145	8	1,305	0,0141
9	1,362	0,0178	9	1,365	0,017
10	1,394	0,025	10	1,385	0,024
11	1,321	0,034	11	1,295	0,033
12	1,285	0,046	12	1,255	0,0441
13	1,329	0,062	13	1,26	0,0612

14	1,271	0,079	14	1,262	0,0751
15	1,18	0,081	15	1,274	0,0864
16	1,285	0,0971	16	1,268	0,0952
17	1,398	0,1151	17	1,275	0,1123
18	1,301	0,1342	18	1,288	0,1324
19	1,302	0,1533	19	1,298	0,1516
20	1,349	0,1736	20	1,298	0,1711
21	1,322	0,1954	21	1,296	0,192
22	1,325	0,2181	22	1,312	0,2132
23	1,324	0,2465	23	1,268	0,2415
24	1,236	0,2741	24	1,22	0,2685
25	1,195	0,3031	25	1,168	0,2961
26	1,145	0,361	26	1,12	0,3241
28	1,105	0,4182	28	1,055	0,352
30	1,106	0,475	30	1,005	0,407

а)

б)

Кесте 4-де келтірілген мәліметтер негізінде NREL базасының эталондық мәндеріне сәйкес модель тексеріледі:

а) Параметр: көтеру коэффициенті C_l 

б) Параметр: қарсылық күшінің коэффициенті C_d
6-сурет – 1-4 профилі үшін C_l және C_d атқылау бұрышының өзгеруіне тәуелділігі

Қаржыландыру туралы ақпарат

Бұл ғылыми мақала Қазақстан Республикасы Ғылым және жоғары білім Министрлігінің 2025–2027 жылдарға арналған ғылыми және ғылыми-техникалық жобалар бойынша гранттық қаржыландыру аясындағы АР26100165 «Бірегей жылулық қорғанысы бар шұғыл континенталды аймақтарға арналған жел турбинасын жобалау және жасау» жобасын іске асыру барысында жазылды.

Қорытынды

Қалақша аэродинамикасын бағалауда алынған сандық нәтижелердің эталондық мәндермен салыстырылуы модельдеу әдісінің сенімділігін растайды. Бұл әдіс жел электр станцияларын жобалау процесінде және олардың IEC 61400:2019 сияқты халықаралық стандарттарға сәйкестігін бағалауда шешуші рөл ойнайды. Аэродинамикалық параметрлердің кең ауқымын, соның ішінде C_l , C_d , атқылау бұрыштары мен айналу моментін ескеру қажет. BEM әдісі аэродинамикалық жүктемелерді есептеудің өнеркәсіптік стандарты ретінде қолданылады және қалақша бойындағы параметрлердің нақты таралуын бағалауға мүмкіндік береді. Нәтижесінде, бұл әдіс сандық модельдеумен бірге қалақшалардың стандарттарға сәйкестігін кешенді түрде бағалауға ғылыми негіз береді.

Пайдаланылған деректер тізімі

1 QBlade Team. Blade Element Momentum Method [Электронный ресурс]. – QBlade Documentation. – Режим доступа: <https://docs.qblade.org/src/theory/aerodynamics/bem/bem.html>

2 Байжұма, Ж. Е., Манатбаев, Р. Қ., Қаласов, Н. Б., Сабырова, А. Ф. Оценка производительности вертикальных турбин с вертикальной осью вращения на основе импульсных моделей. Вестник АУЭС, № 3 (70), 2025, .7–20 с.

3 Қаласов, Н. Б., Манатбаев, Р. Қ., Байжұма, Ж. Е., Сатқынова, А. Қ. Савониус роторының өнімділігін қалақ арқылы жақсартудың сандық болжамы, Торайғыров университетінің хабаршысы. Энергетикалық сериясы. № 2. 2025, 225–242 с.

4 Әуезхан, Н. Т., Қаласов, Н. Б., Байжұма, Ж. Е., Исатаев, М. С. Төрт қалақшалы дарье турбинасының аэродинамикалық көрсеткіштерін CFD тәсілімен зерттеу, АУЭС хабаршысы. энергетикалық сериясы. № 4. 2025, 52–65-6.

5 Li, Y., Yang, S., Feng, F., Tagawa, K. A review on numerical simulation based on CFD technology of aerodynamic characteristics of straight-bladed vertical axis wind turbines // Energy Reports. – 2023. – Vol. 9. – <https://doi.org/10.1016/j.egy.2023.03.082>

6 Global Wind Energy Council (GWEC). 2024 жылғы жаһандық жел энергетикасы туралы есеп [Электронный ресурс]. – Париж: GWEC, 2024. – Режим доступа: https://img.saurenergy.com/2024/05/gwr-2024_digital-version_final-1-compressed.pdf

7 Maintenance Management of Wind Turbines [Электронный ресурс]. – под ред. MDPI. – Базель : MDPI, 2022. – 210 с. – ISBN 978–3–0365–2613–6

8 Barnes, R. H., Morozov, E. V. Structural optimisation of composite wind turbine blade structures with variations of internal geometry configuration // Composite Structures. – 2016. – Vol. 152. – C. 158–167

9 Li, S., Li, Q., Liang, J., Guo, P. Investigation of the Transiting Test Method for the Aerodynamic Performance of Vertical Axis Wind Turbine Using Wind Generated by a Moving Vehicle // Experimental Techniques. – 2022. – Vol. 46, № 3. – <https://doi.org/10.1007/s40799-021-00485-x>

10 National Renewable Energy Laboratory (NREL). About NREL [Электронный ресурс]. – Голден, Колорадо: U.S. Department of Energy, 2024. – Режим доступа: <https://www.nrel.gov/about>

11 ANSYS, Inc. Engineering simulation and 3D design software. – Canonsburg, PA: ANSYS, 2020.

12 International Electrotechnical Commission. IEC 61400–1 : Wind Turbines – Part 1 : Design Requirements. – Geneva: IEC, 2019. – 274 p.

13 Dong, G., Qin, J., Li, Z., Yang, X. Characteristics of wind turbine wakes for different blade designs // Journal of Fluid Mechanics. – 2023. – Vol. 965. – <https://doi.org/10.1017/jfm.2023.385>

29.07.25 ж. баспаға түсті.

13.11.25 ж. түзетулерімен түсті.

27.02.26 ж. басып шығаруға қабылданды.

Ж. Е. Байжұма¹, Н. Б. Қаласов²,

*А. Ф. Сабырова³, Г. М. Молдашева⁴

^{1,2,3,4}Казахский Национальный университет имени аль-Фараби,

Республика Казахстан, г. Алматы.

Поступило в редакцию 29.07.25

Поступило с исправлениями 13.11.25.

Принято в печать 27.02.26.

**ЧИСЛЕННЫЙ МЕТОД ОЦЕНКИ СООТВЕТСТВИЯ
АЭРОДИНАМИКИ ЛОПАСТЕЙ ВЕТРОВОЙ ТУРБИНЫ
ТРЕБОВАНИЯМ МЕЖДУНАРОДНЫХ СТАНДАРТОВ**

В настоящее время развитие возобновляемых источников энергии является важным путем к обеспечению экологической безопасности и энергетической устойчивости. Среди них ветроэнергетика имеет особое значение как неисчерпаемый, экологически безопасный и широко доступный источник энергии. Однако эффективность работы ветровых турбин напрямую зависит от аэродинамических характеристик одного из их основных элементов – лопастей.

Лопастей подвержены износу, механическим повреждениям и воздействию климатических факторов. Эта проблема особенно актуальна в некоторых регионах Казахстана с суровыми климатическими условиями. Поэтому оценка эффективности конструкции лопасти и её соответствия международным стандартам является важной научной и производственной задачей. Кроме того, использование методов высокоточной моделирования позволяет прогнозировать поведение лопасти в различных условиях. Это дает возможность повысить безопасность и производительность при проектировании ветровых турбин.

Результаты исследования могут стать основой для повышения качества отечественного производства ветровых турбин в будущем.

В данном исследовании была произведена оценка аэродинамических характеристик лопасти с использованием метода численного моделирования. Результаты показали, что эффективность лопасти соответствует международным стандартам, а выявленные особенности могут служить основой для дальнейшего совершенствования конструкции. Работа вносит вклад в развитие ветроэнергетики.

Ключевые слова: ветрогенератор, лопасть, аэродинамический профиль, стандарты, моделирование, эталон.

Zh. Y. Baizhuma¹, N. B. Kalasov²,

*A. G. Sabyrova³, G. M. Moldasheva⁴

^{1,2,3,4}Al-Farabi Kazakh National University,

Republic of Kazakhstan, Almaty.

Received 29.07.25.

Received in revised form 13.11.25.

Accepted for publication 27.02.26.

A NUMERICAL METHOD FOR ASSESSING THE COMPLIANCE OF WIND TURBINE BLADE AERODYNAMICS WITH INTERNATIONAL STANDARDS

Currently, the development of alternative energy sources is an important way to ensure environmental safety and achieve energy sustainability. Among them, wind energy holds particular significance as an inexhaustible, environmentally friendly, and widely accessible source of energy. However, the efficiency of wind turbines directly depends on the aerodynamic characteristics of one of their main components – the blades.

Blades are often subject to wear, mechanical damage, and the influence of climatic factors. This issue is especially relevant in certain regions of Kazakhstan with harsh climatic conditions. Therefore, evaluating the efficiency of the blade design and its compliance with international standards is an important scientific and industrial task. In addition, the use of high-precision modeling methods allows for predicting blade behavior under various conditions. This provides an opportunity to improve safety and performance in wind turbine design. The research results may serve

as a basis for improving the quality of domestic wind turbine production in the future.

In this study, the aerodynamic characteristics of the blade were evaluated using a numerical modeling method. The results showed that the blade's efficiency meets international standards, and the identified features may serve as a basis for further design improvement. The work contributes to the development of wind energy.

Keywords: wind turbine, blade, aerodynamic profile, standards, modeling, reference.

**А. С. Барукин¹, *А. Ж. Динмуханбетова²,
Р. М. Машрапова³**

^{1,2,3}Торайғыров университет, Республика Казахстан, г. Павлодар.

¹ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-5969-4030>

²ORCID: <https://orcid.org/0009-0006-4538-9672>

³ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-9509-5767>

*e-mail: ardi100909@mail.ru

ОЦЕНКА ЭФФЕКТИВНОСТИ ЗАМЕНЫ ВЫКЛЮЧАТЕЛЕЙ В СХЕМАХ ОРУ ПОДСТАНЦИЙ 500 КВ

Обсуждаются особенности применения таблично-логического метода для количественной оценки надёжности схем открытых распределительных устройств (ОРУ) электрических подстанций напряжением 500 кВ. В качестве основного показателя надёжности рассматривается аварийный недоотпуск электроэнергии (W), отражающий потери, возникающие при отказах оборудования и в период его последующего восстановления. В работе анализируются схемы подстанций «Екибастузская» и «Алма» с различными типами выключателей – воздушными и элегазовыми. Приводится методика построения расчётных режимов функционирования схем ОРУ, определения кодов отказов, а также формирования таблиц логических связей, связывающих неисправности с последствиями в виде потерь мощности. Используются статистические данные по частоте отказов, длительности восстановления и вероятности планового ремонта для каждого элемента схемы. Дополнительно учитываются особенности функционирования устройств автоматического повторного включения, а также возможные последствия отказов выключателей при коротких замыканиях. Особое внимание уделено влиянию типа выключателя на величину показателя W . Анализ проведён с учётом различных режимов работы подстанций: нормального, планового и аварийного ремонтов. Представленный подход может быть использован для технико-экономического обоснования реконструкции схем ОРУ, выбора оборудования при

проектировании новых подстанций и повышения надёжности электроснабжения потребителей.

Ключевые слова: электрическая подстанция, схема ОРУ, таблично-логический метод, недоотпуск электроэнергии, надёжность электроснабжения, выключатель, реконструкция подстанций.

Введение

Электрические подстанции высокого напряжения играют ключевую роль в обеспечении надёжного и бесперебойного электроснабжения потребителей. Их основная функция заключается в приёме, преобразовании и передаче электроэнергии от источников генерации к распределительным сетям и крупным промышленным объектам. Ключевым элементом подстанций остаются открытые распределительные устройства (ОРУ), от конструктивных и схемных решений которых в значительной степени зависит надёжность работы всей энергосистемы [1].

Среди элементов, оказывающих существенное влияние на надёжность схем ОРУ, особое место занимают высоковольтные выключатели. Их отказ способен привести к отключению нескольких присоединений, каскадному развитию аварий и значительным потерям электроэнергии [2; 3]. В связи с этим важной задачей является выбор таких выключателей и схем, которые сводят к минимуму риски отказов. Опыт эксплуатации показывает, что в последние десятилетия всё чаще возникает вопрос замены устаревших воздушных выключателей (ВВ) на более надёжные элегазовые (ЭВ), обладающие лучшими эксплуатационными характеристиками, в том числе по числу отказов и времени восстановления [4].

Одним из количественных критериев оценки надёжности схем ОРУ является показатель аварийного недоотпуска электроэнергии (W), отражающий ожидаемые потери при отказах и последующих ремонтах. Данный показатель позволяет учитывать не только частоту отказов, но и их последствия в виде снижения отпускаемой мощности, продолжительности перерывов и недоиспользования установленной мощности. Применение показателя W позволяет оценивать технические решения с точки зрения как надёжности, так и потенциального экономического ущерба.

Существуют различные методы оценки W , включая имитационный, графоаналитический и таблично-логический методы [5]. Последний отличается наглядностью, возможностью учёта всех режимов работы схемы (нормального, плановых и аварийных ремонтов) и применим как на этапе проектирования, так и при обосновании реконструкции действующих

объектов. В предыдущих исследованиях таблично-логический метод успешно применялся нами для оценки надёжности схем ОРУ электрических станций [6; 7; 8], однако его применение к подстанциям с различными типами выключателей требует отдельного анализа.

Целью настоящей работы является проведение сравнительной оценки надёжности схем ОРУ подстанций 500 кВ с использованием воздушных и элегазовых выключателей на основе расчёта аварийного недоотпуска электроэнергии с помощью таблично-логического метода. В качестве объектов исследования выбраны две крупные подстанции Казахстана – «Екибастузская» и «Алма», для которых выполнено моделирование отказов и расчёт показателя W в различных режимах работы.

Материалы и методы

Ниже представлены результаты расчетов аварийного недоотпуска электроэнергии (W) для схем ОРУ электрических подстанций «Екибастузская» и «Алма», полученные на основе использования известного таблично-логического метода [5].

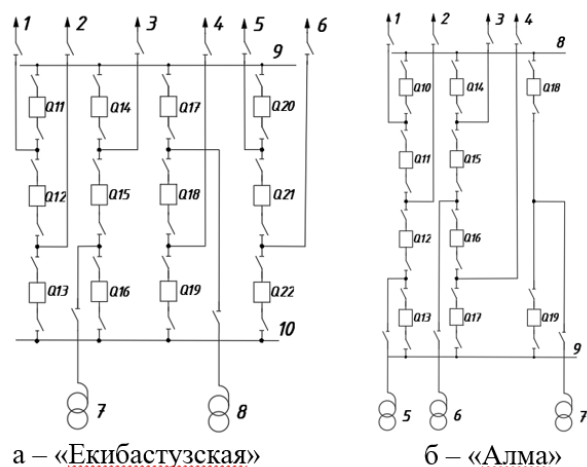


Рисунок 1 – Схемы ОРУ электрических подстанций напряжением

В качестве примера рассмотрим работу схемы ОРУ подстанции «Екибастузская» (рисунок 1, а) с вводными 1–4 и отходящими 5–8 присоединениями с мощностью 300–600 МВт.

В нормальном режиме выключатели схемы Q11-Q22 включены, и ОРУ работает следующим образом:

– при коротком замыкании (КЗ) на вводном присоединении 1 (через которое осуществляется подача мощности на подстанцию) от действия его релейной защиты (РЗ) отключаются выключатели Q11 и Q12, что приводит к потере мощности (ΔP) присоединения 1 на время t_1 его аварийного ремонта. При КЗ на присоединениях 2-4 все аналогично;

– при КЗ на отходящем присоединении 5 (предназначенном для передачи мощности потребителям) от действия его РЗ отключаются выключатели Q20 и Q21. При неустойчивом КЗ через время t_2 срабатывания устройства автоматического повторного включения (АПВ) выключатели Q20 и Q21 включаются обратно, и присоединение 5 подключается к схеме. После отключения устойчивого КЗ присоединение 5 выводится в ремонт. В обоих случаях происходит кратковременное и длительное отключение присоединения 5, соответственно, со снижением ΔP . При КЗ на присоединениях 6–8 схема работает аналогично;

– при КЗ на сборной шине 9 от действия ее РЗ отключаются выключатели Q11, Q14, Q17 и Q20. При этом не происходит потери мощности. Аналогично при КЗ на сборной шине 10.

– при отказе типа «КЗ в обе стороны» выключателя Q11 от действия РЗ присоединения 1 отключаются выключатели Q12, Q14, Q17 и Q20, что приводит к отключению этого присоединения с кратковременной потерей ΔP . После отключения выключателя Q11 от схемы, включаются выключатели Q12, Q14, Q17 и Q20, и присоединение 1 подключается к схеме. При отказе типа «КЗ в обе стороны» выключателей Q12- Q22 схема работает аналогично;

– отказ выключателя Q12 в отключении КЗ на вводном присоединении 1 приводит к потере двух вводных присоединений 1 и 2, так как от действия устройства резервирования отказа выключателя отключается выключатель Q13 (выключатель Q11 был отключен РЗ присоединения 1). После соответствующих оперативных переключений присоединение 1 и выключатель Q12 выводятся в ремонт на время t_1 (длительная потеря ΔP), а выключатели Q11 и Q13 персоналом включаются обратно, и присоединение 2 подключается к схеме (кратковременная потеря ΔP). При КЗ на присоединениях 2-8 и отказах в отключении выключателей Q11-22 схема работает аналогично.

Принцип работы схемы ОРУ при нахождении в ремонте любого из её элементов аналогичен рассмотренному выше.

В таблице 1 приведены исходные статистические данные [9; 10] присоединений и элементов схемы рассматриваемой ОРУ-500 кВ подстанции «Екибастузская». При этом для неустойчивых КЗ коэффициент

АПВ $k_{\text{АПВ}}=0,25$ [11] и вероятность отказа выключателей при отключениях

КЗ $Q_{\text{КЗ}}^{\text{вв}}=0,043$ ($Q_{\text{КЗ}}^{\text{вв}}=0,061$) [12].

Таблица 1 – Исходные данные

Присоединение и элемент	Обозначение	Частота отказа λ , 1/год	Длительность восстановления τ , 10^{-3} год	Вероятность планового ремонта $q_{\text{пл}}$, 10^{-3} о.е.
Вводное присоединение	1-4	0,03	57	6,85
Отходящее присоединение	5-8	1,2	1,94	12,32
Сборные шины	9, 10	0,004	2,87	
ЭВ	11-22	0,14	5,5	8,33
ВВ		0,13	10,27	2,05

Таблица 2 – Расчетно-логические связи схемы ОРУ подстанции «Екибастузская»

Отказ присоединения или элемента (КЗ на нем)	Вид отказов	Код аварии				
		q _j	0,85	10,3·10 ⁻³	2,32·10 ⁻³	
		n	1	2	2	
		j	j0	j1	j2	
1	КЗ	-1Т		-	-	
2				-1Т		
3						
4						
11 (1)	ОВКЗ	-				
12 (2)		2Т/1Т	-			
15 (3)		1Т1Л/1Т				
18 (4)						

Коды аварий: «-1Т» - длительная потеря присоединения Т (трансформатора) с потерей мощности ΔP ; «2Т/1Т» - кратковременное отключение двух присоединений Т с переходом в длительный характер аварии с отключением одного присоединения Т и потерей мощности ΔP ; «1Т1Л/1Т» - кратковременное отключение двух присоединений Т и Л (линии) с переходом в длительный характер аварии с отключением одного присоединения Т

Расчетные режимы: нормальный без ремонтов – j0; плановый (проводимый с плановым ремонтом выключателей Q11 и Q12) и аварийный вводного присоединения 1 – j1 и j2, соответственно; то же для вводного

присоединения 3 с выключателями Q14 и Q15 – j3 и j4; то же для отходящего присоединения 5 – j5 и j6; то же для отходящего присоединения 7 – j7 и j8; то же для сборных шин 9 с выключателями Q11, Q14, Q17, Q20 – j9 и j10; аварийный ремонт выключателей Q11, Q12, Q14, Q15, Q16 и Q20 – j11, j12, j13, j14, j15 и j16, соответственно; плановый и аварийный ремонт выключателя Q21 – j17 и j18, соответственно.

Расчетная относительная длительность режимов: $q_{j,\text{пл}}=q_{\text{пл},i}$; $q_{j,\text{ав}}=\lambda_i \tau_i$; $q_{j0}=1-\sum_{j=1}^m q_j$

Фрагмент расчетно-логических связей с кодами аварий в режимах j0-j2 представлен в таблице 2.

В таблице 3 представлены результаты расчетов.

Таблица 3 – Ожидаемые надежности схемы ОРУ с ВВ (ЭВ)

Код	Частота аварии Λ , 10^{-3} 1/год	Длительность ликвидации аварии, год		Теряемая мощность, МВт		Аварийный недоотпуск электроэнергии W , кВт·ч/год 10^6
		$\tau_{\text{ко.п.}}$, 10^{-5}	$\tau_{\text{кв.р.}}$, 10^{-3}	$\Delta P_{\text{о.п.}}$	$\Delta P_{\text{в.р.}}$	
				10^2		
-1Т	60,4 (33)	—	1,94	—	3	0,308 (0,169)
2Т/1Т	1,6 (1,06)	5,7	10,27(5,55)	6		0,044 (0,0156)
1Т1Л/1Т	0,9 (0,51)			3		0,0244 (0,0074)
.....						
Итого						123,6 (105,2)

Результаты и обсуждение

Аналогично был проведен расчет аварийного недоотпуска электроэнергии для подстанции «Алма» (рисунок 1, б) напряжением 500 кВ. Используя W , для рассматриваемых схем ОРУ электрических подстанций можно определить эффективность в уменьшении ΔW при реконструкции путем замены воздушных выключателей на элегазовые, согласно формуле

$$\Delta W = \frac{W^{\text{ВВ}} - W^{\text{ЭВ}}}{W^{\text{ВВ}}} \times 100\%. \quad (1)$$

Результаты расчетов W и ΔW для подстанций «Екибастузская» и «Алма» сведены в таблицу 4.

Таблица 4 – Результаты расчетов W и ΔW

Подстанция	W^{BB}	$W^{ЭВ}$	$\Delta W, \%$
	$\times 10^6 \text{ кВт}\cdot\text{ч/год}$		
«Екибастузская»	123,6	105,2	15
«Алма»	46,6	37,7	19

Полученные значения показателя W демонстрируют, что при использовании элегазовых выключателей наблюдается значительное снижение потерь электроэнергии по сравнению с вариантами с воздушными выключателями.

Информация о финансировании

Данное исследование финансируется Комитетом науки Министерства науки и высшего образования Республики Казахстан (грант № AP27511017).

Выводы

Проведённое исследование позволило выполнить количественную оценку надёжности схем открытых распределительных устройств (ОРУ) электрических подстанций напряжением 500 кВ на основе анализа аварийного недоотпуска электроэнергии W . Результаты расчетов показали, что замена воздушных выключателей на элегазовые позволит снизить W в рассматриваемых схемах ОРУ на 15% и 19%, соответственно. Это подтверждает эффективность модернизации выключателей с целью повышения надёжности электроснабжения. Результаты исследования могут быть использованы при технико-экономическом обосновании реконструкции высоковольтных подстанций.

Список использованных источников

1 **Vianna, E.** Substations SF6 circuit breakers : Reliability evaluation based on equipment condition // Electric Power Systems Research, 2017. – Vol. 142. – P. 36–46.

2 **Dong, J., Koval, D., Zuo, M.** Impact of circuit breaker failure modes on the reliability of the gold book standard network // Proc. of 2004 International Conference on IEEE Industrial and Commercial Power Systems Technical, 2004. – P. 102–108.

3 **Lu, Y., Li, Y.** A novel fault diagnosis method for circuit breakers based on optimized affinity propagation clustering // International Journal of Electrical Power & Energy Systems, 2020. – Vol. 118. – P. 105651.

4 **Zhang, X.** Reliability estimation of high voltage SF6 circuit breakers by statistical analysis on the basis of the field data // Electric power systems research, 2013. – Vol. 103. – P. 105–113.

5 **Гук, Ю. Б., Карпов, В. В., Лapidус, А. А.** Теория надежности. Введение. – Санкт-Петербург : Изд-во Политехн. Ун-та, 2009. – 171 с.

6 **Клецель, М. Я., Барукин, А. С., Динмуханбетова, А. Ж., Әмірбек Д. Ә.** Влияние надежности элементов кольцевых схем электрических станций на недоотпуск электроэнергии. // Вестник Торайғыров университет. Энергетическая серия, 2022. – № 1. – С. 99–110.

7 **Барукин, А. С., Клецель, М. Я., Динмуханбетова, А. Ж., Әмірбек Д. Ә.** Ввод дополнительного выключателя в блок генератор-трансформатор для энергосбережения в схемах ОРУ электростанций // Энергетика. Изв. высш. учеб. заведений и энерг. объединений СНГ, 2023. – Т. 66, № 4. – С. 333–343.

8 **Dinmukhanbetova, A.** Reduction of Energy Underdelivery at Nuclear Power Plants by Enhancing the Reliability of 3/2 Schemes // International Conference on Industrial Engineering, Applications and Manufacturing, ICIEAM, 2025. – P. 327–332.

9 **Балаков, Ю. Н., Мисриханов, М. Ш., Шунтов, А. В.** Проектирование схем электроустановок. Электронный ресурс : учебное пособие для вузов. – М. : Издательский дом МЭИ, 2016. – 288 с.

10 **Абдурахманов, А. М., Мисриханов, М. Ш., Федоров, В. Е., Шунтов, А. В.** О надежности ячеек элегазовых выключателей 110–750 кВ подстанций // Методические вопросы исследования надежности больших систем энергетики. Вып 61. Проблемы исследования и обеспечение надежности систем энергетики – Иркутск : ИСЭМ СО РАН, 2011. – С. 93–97.

11 **Андреев, В. А.** Релейная защита и автоматика систем электроснабжения : Учебник для вузов. – М. : Высш. шк., 2006 – 639 с.

12 **Непомящий, В. А., Дарьян, Л. А.** Надежность оборудования электрических сетей 220–750 кВ энергосистем. – М. : НТФ «Энергопрогресс», 2018. – 124 с.

References

1 **Vianna, E.** Substations SF6 circuit breakers: Reliability evaluation based on equipment condition // Electric Power Systems Research, 2017. – Vol. 142. – P. 36–46.

2 **Dong, J., Koval, D., Zuo, M.** Impact of circuit breaker failure modes on the reliability of the gold book standard network // Proc. of 2004 International Conference on IEEE Industrial and Commercial Power Systems Technical, 2004. – P. 102–108.

3 **Lu, Y., Li, Y.** A novel fault diagnosis method for circuit breakers based on optimized affinity propagation clustering // International Journal of Electrical Power & Energy Systems, 2020. – Vol. 118. – P. 105651.

4 **Zhang, X.** Reliability estimation of high voltage SF6 circuit breakers by statistical analysis on the basis of the field data // Electric power systems research, 2013. – Vol. 103. – P. 105–113.

5 **Guk, Yu. B., Karpov, V. V., Lapidus, A. A.** Teoriya nadezhnosti. Vvedenie [Theory of reliability. Introduction]. – St. Petersburg : Publishing House of the Polytechnic University. Un-ta, 2009. – 171 p.

6 **Kletsel, M. Ya, Barukin, A. S., Dinmukhanbetova, A. Zh., Amirbek, D. A.** Vliianie nadezhnosti elementov kol'tsevykh skhem elektricheskikh stantsii na nedootpusk elektroenergii [Influence of the reliability of ring circuit elements at power plants on the energy not supplied] // Bulletin of Toraighyrov University. Series: Energetics, 2022. – No. 1. – P. 99–110.

7 **Barukin, A. S., Kletsel, M. Ya, Dinmukhanbetova, A. Zh., Amirbek, D. A.** Vvod dopolnitel'nogo vykliuchatel'ia v blok generator-transformator dlia energoberezheniia v skhemakh ORU elektrostantsii [Introduction of an auxiliary breaker into the generator-transformer block for energy saving in open switchgear circuits of power plants] // Energetika. Proceedings of CIS higher education institutions and power engineering associations. – Vol. 66, No. 4. – P. 333–343.

8 **Dinmukhanbetova, A.** Reduction of Energy Underdelivery at Nuclear Power Plants by Enhancing the Reliability of 3/2 Schemes // International Conference on Industrial Engineering, Applications and Manufacturing, ICIEAM, 2025. – P. 327–332.

9 **Balakov, Yu. N., Misrikhanov, M. S., Shunts, A. V.** Proektirovanie shem elektroustanovok : uchebnoe posobie dlja vuzov [Designing of electrical circuits : textbook for universities]. – M. : Publishing house MPEI, 2016. – 288 p.

10 **Abdurakhmanov, A. M., Misrikhanov, M. Sh., Fedorov, V. E., Shuntov, A. V.** O nadezhnosti jacheek elegazovykh vykljuchatelej 110-750 kV

podstantsij. Metodicheskie voprosy issledovanija nadezhnosti bol'shih system energetiki. Vyp 61. Problemy issledovanija i obespechenie nadezhnosti system energetiki [On the reliability of the cells of gas switches 110–750 kV substations. Methodological issues of reliability research of large energy systems. Issue 61. Problems of research and ensuring the reliability energy systems] – Irkutsk : ISEM SO RAN, 2011. P. 93–97.

11 **Andreev, V. A.** Relejnaja zaschita i avtomatika sistem elektrosnabzhenija: Uchebnik dlja vuzov [Relay protection and automation of power supply systems: Textbook for universities]. – M. : Higher School, 2006 – 639 p.

12 **Nepomnyashchy, V. A., Daryan, L. A.** Nadezhnost oborudovanija elektricheskikh setej 220–750 kV energosistem [Reliability of the equipment of electric networks of 220–750 kV power systems]. – M. : NTF «Energoprogress», 2018 – 124 p.

Поступило в редакцию 01.08.25

Поступило с исправлениями 05.11.25.

Принято в печать 27.02.26.

*А. С. Барукин¹, *А. Ж. Динмукханбетова², Р. М. Маширапова³*

^{1,2,3}Торайғыров университеті,

Қазақстан Республикасы, Павлодар қ.

01.08.25 ж. баспаға түсті.

05.11.25 ж. түзетулерімен түсті.

27.02.26 ж. басып шығаруға қабылданды.

500 КВ ҚОСАЛҚЫ СТАНЦИЯЛАРДЫҢ АШЫҚ ТАРАТУ ҚҰРЫЛҒЫЛАРЫ СХЕМАЛАРЫНДА АЖЫРАТҚЫШТАРДЫ АУЫСТЫРУДЫҢ ТИІМДІЛІГІН БАҒАЛАУ

500 кВ кернеулі электрлік қосалқы станциялардың ашық тарату құрылғылары (АТҚ) схемаларының сенімділігін сандық бағалау үшін кестелік-логикалық әдісті қолдану ерекшеліктері қарастырылады. Негізгі сенімділік көрсеткіші ретінде — жабдықтардың істен шығуы мен оны қалпына келтіру кезеңінде пайда болатын шығындарды сипаттайтын апаттық электр энергиясын жеткізбеу (W) алынады. Жұмыста «Екібастұз» және «Алма» қосалқы станцияларының әртүрлі типтегі ажыратқыштары бар схемалары — ауа және элегазды — талданады. АТҚ схемаларының жұмыс режимдерін есептеу, ақау кодтарын анықтау және қуат шығындары түріндегі

салдармен байланысты логикалық байланыстар кестесін құру әдістемесі келтіріледі. Схема элементтері үшін ақаулар жиілігі, қалпына келтіру ұзақтығы және жоспарлы жөндеу ықтималдығы бойынша статистикалық деректер қолданылады. Сонымен қатар автоматты қайта қосу құрылғыларының жұмыс ерекшеліктері мен қысқа тұйықталу кезіндегі ажыратқыштардың істен шығу салдарлары ескеріледі. Ажыратқыш түрінің W көрсеткішіне әсеріне ерекше назар аударылады. Талдау қосалқы станциялардың түрлі жұмыс режимдерін: қалыпты, жоспарлы және апаттық жағдайларын ескере отырып жүргізілді. Ұсынылған тәсіл АТҚ схемаларын реконструкциялауды техникалық-экономикалық негіздеу, жаңа қосалқы станцияларды жобалау кезінде жабдықтарды таңдау және тұтынушыларды электрмен жабдықтаудың сенімділігін арттыру үшін пайдаланылуы мүмкін.

Кілтті сөздер: электрлік қосалқы станция, ашық тарату құрылғылары схемасы, кестелік-логикалық әдіс, электр энергиясын жеткізбеу, электрмен жабдықтаудың сенімділігі, ажыратқыш, қосалқы станцияларды қайта жаңарту.

A. S. Barukin¹, *A. Zh. Dinmukhanbetova², R. M. Mashrapova³

^{1,2,3}Toraighyrov University,

Republic of Kazakhstan, Pavlodar.

Received 01.08.25.

Received in revised form 05.11.25.

Accepted for publication 27.02.26.

ASSESSMENT OF THE EFFICIENCY OF CIRCUIT BREAKER REPLACEMENT IN 500 KV SUBSTATION SWITCHYARD SCHEMES

The paper discusses the application features of the tabular-logical method for the quantitative assessment of the reliability of 500 kV substation open switchyard (OSY) schemes. The primary reliability indicator considered is the emergency energy not supplied (W), which reflects the losses occurring due to equipment failures and the subsequent recovery period. The study analyzes the schemes of the “Ekibastuz” and “Alma” substations with different types of circuit breakers – air-insulated and gas-insulated (SF₆). A methodology is presented for constructing operating regimes, identifying failure codes, and generating logical dependency

tables linking faults with power loss consequences. Statistical data on failure frequency, recovery duration, and the probability of scheduled maintenance are used for each component of the scheme. Additionally, the behavior of automatic reclosing devices and the impact of circuit breaker malfunctions during short circuits are considered. Particular attention is paid to the influence of circuit breaker type on the W indicator. The analysis accounts for various operational modes of substations: normal, scheduled maintenance, and emergency repairs. The proposed approach can be applied for the techno-economic justification of OSY scheme modernization, equipment selection for new substations, and enhancing the reliability of power supply to consumers.

Keywords: electrical substation, switchyard scheme, tabular-logical method, energy not supplied, power supply reliability, circuit breaker, substation reconstruction.

<https://doi.org/10.48081/BGQF1945>

**A. G. Burumbayev¹, Ye. N. Makhambetov²,
Zh. O. Sadyk³, *N. A. Uakhit⁴**

^{1,2,3}Chemical-metallurgical institute named after Zh. Abishev,
Republic of Kazakhstan, Karaganda;

¹Karaganda Industrial University, Republic of Kazakhstan, Temirtau;

⁴Toraighyrov University, Republic of Kazakhstan, Pavlodar.

¹ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-5276-2259>

²ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-8613-9932>

³ORCID: <https://orcid.org/0009-0006-8557-1532>

⁴ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-1626-2895>

*e-mail: nauryzmc@gmail.com

INVESTIGATION OF THE ELECTRICAL RESISTIVITY OF CALCINED PETROLEUM COKE

Calcined coke is used to manufacture prebaked anode blocks which are used in electrolytic cells for smelting non-ferrous metals, electrodes for electric arc furnaces for smelting steel, ferroalloys as well as graphite products. This study investigates the specific electrical resistivity (SER) of calcined petroleum coke produced at the Installation of Calcined Petroleum Coke. Measurements were carried out using the V. I. Zhuchkov method on a laboratory high-temperature Tamman resistance furnace. The coke samples were crushed and sieved into +3 mm and -5 mm fractions, with a layer thickness of 30 mm. The temperature range of the experiment was 25–1500 °C. It was found that the SER of the coke decreases from 761 $\mu\text{Ohm}\times\text{m}$ at 25 °C to 536 $\mu\text{Ohm}\times\text{m}$ at 1500 °C, corresponding to a reduction of more than 29 %. The results confirm the high electrical conductivity and thermal stability of calcined petroleum coke, making it suitable for use in high-temperature electrothermal and metallurgical processes.

Keywords: specific electrical resistivity, calcined petroleum coke, temperature, resistance furnace, V. I. Zhuchkov method.

Introduction

At present, petroleum coke is one of the most demanded carbon-containing materials widely used in ferrous and non-ferrous metallurgy, as well as in the production of electrode and anode materials [1; 2; 3]. Considerable interest in this product is due to its high chemical stability, developed porous structure, and relatively low cost compared to other forms of carbon. In Kazakhstan, the Pavlodar Calcined Petroleum Coke Plant operates, providing high-quality calcined coke for aluminum and ferroalloy industries.

Coke calcination is a complex physicochemical process occurring under high temperatures and accompanied by parallel and sequential decomposition and compaction of green petroleum coke. During calcination, the material undergoes destructive decomposition, forming coke and depleting it of hydrogen. This hydrogen is released into the combustion chamber as methane and other hydrocarbons, followed by combustion. The entire process is accompanied by changes in the structure and density of the coke. Coke calcination increases the material's resistivity and mechanical strength, increases its apparent and actual density, and completely removes moisture and volatile matter. The main factors influencing the quality of the finished product and the completeness of the process are the temperature in the calcination zone and the residence time of the coke in the furnace. Other important calcination factors include the particle size distribution of the feedstock, the ratio of feed volume to furnace volume, and the amount of air required to burn off volatile matter.

Petroleum coke is a collective term for the products of deep petroleum refining - solid substances consisting primarily of carbon. Petroleum coke is the primary raw material for the production of aluminum electrolytic cell anodes. The quality of the coke largely determines the technology, ecology, and economics of aluminum production [4].

Calcined coke is used to manufacture prebaked anode blocks which are used in electrolytic cells for smelting non-ferrous metals, electrodes for electric arc furnaces for smelting steel, ferroalloys, carbides as well as graphite products [5].

High volatile content, lack of electrical conductivity, low density, and mechanical strength make green coke unsuitable for anode production. Before use in production, green coke undergoes pre-calcination at 1100-1300 °C in a reducing atmosphere. This removes moisture and volatiles, causes shrinkage and compaction of the structure, forms a crystalline lattice, and significantly increases thermal and electrical conductivity [6].

The key quality characteristics of calcined petroleum coke for the production of prebaked anodes are specific electrical resistance (SER), actual density, and impurity content. SER determines the efficiency of electrical energy transfer,

influencing energy consumption and the quality of the resulting aluminum. Actual density plays a crucial role in ensuring the stability of the anode mass. Impurity content directly impacts the quality of the finished product, as they can reduce its purity during electrolysis [7].

The development of aluminum and ferroalloy production in the Republic of Kazakhstan is accompanied by an increasing demand for domestically produced carbon materials capable of replacing imported analogues. The use of local raw materials and domestic technologies for petroleum coke processing contributes to enhancing the technological independence and economic efficiency of the country's metallurgical sector [8; 9]. Therefore, the assessment of the electrophysical properties of domestically produced calcined petroleum coke is of particular relevance.

One of the most important parameters determining the suitability of carbon materials for high-temperature electrothermal metallurgical processes is the specific electrical resistivity (SER). This parameter is closely related to the structure of the carbon material, the degree of graphitization, and the impurity content [10; 11; 12]. Understanding the dependence of SER on production conditions and subsequent thermal treatment makes it possible to evaluate the quality and potential applications of the material.

To determine the electrophysical characteristics of carbon materials, the method developed by V. I. Zhuchkov is widely used, providing high measurement accuracy and reproducibility of results [13]. The use of this method allows the investigation of conductivity features of petroleum coke at various temperatures and the identification of technological factors influencing the formation of its properties.

The aim of the present study is to investigate the specific electrical resistivity of calcined petroleum coke using V. I. Zhuchkov's method to evaluate its electrophysical characteristics and determine its applicability in electrode materials.

Materials and methods

The study of the specific electrical resistivity (SER) of calcined petroleum coke using the method developed by V. I. Zhuchkov was carried out on a laboratory high-temperature resistance furnace of the Tamman type.

The Tamman furnace is a laboratory apparatus consisting of a graphite tube whose ends are tightly clamped by copper plates to ensure reliable electrical contact.

The furnace body is made of a steel casing, the inner cavity of which is filled with fine-grained refractory material that provides effective thermal insulation and uniform temperature distribution.

The upper cover and the bottom of the furnace are made of an aluminum alloy and equipped with a water-cooling system to prevent overheating of structural components during the experiment.

For the SER measurements, the calcined petroleum coke was preliminarily crushed and sieved into fractions of +3 and –5 mm. The thickness of the coke layer placed in the graphite tube was 30 mm. The temperature range of the study was from 25 °C to 1500 °C.

A schematic diagram of the SER measurement setup is shown in Figure 1.

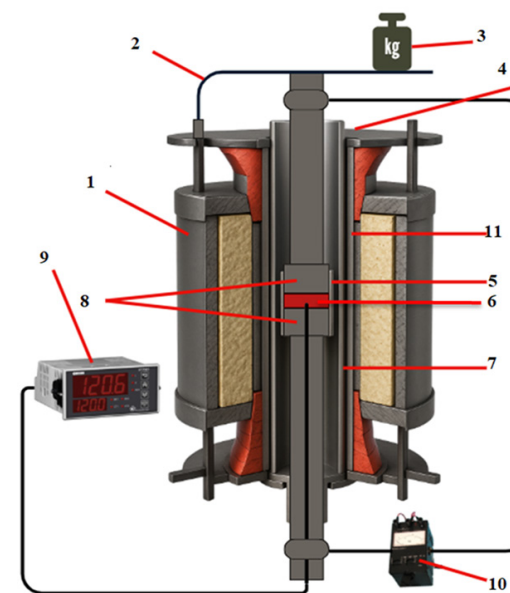


Figure 1 – Setup for determining the SER of charge materials using the V. I. Zhuchkov method

- 1 – Tamman furnace; 2 – load holder; 3 – load; 4 – furnace cover;
- 5 – alumina tube; 6 – material under study; 7 – graphite tube;
- 8 – electrode; 9 – VR 5/20 power supply; 10 – SER measuring unit;
- 11 – refractory base

Results and discussion

This section presents the results of measuring the specific electrical resistivity (SER) of calcined petroleum coke obtained using the V. I. Zhuchkov method.

Figure 2 shows the temperature dependence of the SER of the sample.

The obtained data demonstrate a consistent decrease in specific resistivity with increasing temperature, which is associated with enhanced mobility of charge carriers and improved electrical contact between carbon particles.

The observed changes indicate the thermally stable behavior of the studied coke and its high electrical conductivity within the operating temperature range, which is important for its application as a reducing agent and conductive component in metallurgical processes.

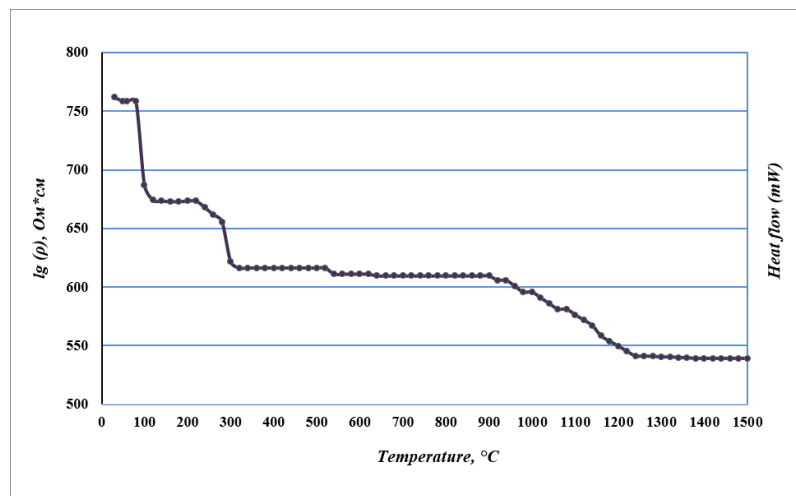


Figure 2 – Temperature dependence of the SER of calcined petroleum coke

As shown in Figure 2, the specific electrical resistivity (ser) of calcined petroleum coke gradually decreases with increasing temperature in the range of 25–1500 °C.

At room temperature (25 °C), the resistivity is about 762 $\mu\text{Ohm}\times\text{m}$, indicating relatively low electrical conductivity of the material in its initial state.

In the temperature range up to 400 °C, a noticeable decrease in SER is observed, which is attributed to degassing and the removal of residual volatile components.

With a further temperature increase from 400 °C to 1000 °C, the resistivity changes only slightly, indicating stabilization of the carbon structure.

At 1200 °C, the SER drops to $\approx 547 \mu\text{Ohm}\times\text{m}$; at 1300 °C, it reaches $\approx 539 \mu\text{Ohm}\times\text{m}$; and at 1500 °C, it further decreases to $\approx 536 \mu\text{Ohm}\times\text{m}$. Thus, increasing the temperature promotes the electrical conductivity of petroleum coke as a result of structural transformations typical for carbon-containing materials under high-temperature treatment.

Conclusion

The study demonstrated that the specific electrical resistivity (SER) of calcined petroleum coke strongly depends on temperature.

In the temperature range of 25–1500 °C, a steady decrease in SER was observed – from 761 $\mu\text{Ohm}\times\text{m}$ to 536 $\mu\text{Ohm}\times\text{m}$, corresponding to a reduction of more than 29 %.

The decrease in resistivity with increasing temperature is attributed to the enhanced mobility of charge carriers and improved particle-to-particle contact, which is typical for carbon-based materials.

The obtained results confirm that calcined petroleum coke exhibits high thermal stability and electrical conductivity, making it a promising material for high-temperature electrothermal processes and metallurgical applications.

References

- 1 Kapustin, V. M., Glagoleva, O. F. Physicochemical Aspects of Petroleum Coke Formation (Review). *Petroleum Chemistry*. – 2016. – 56(1). – P. 3–12.
- 2 Kuzmina, E. V., Karaseva, E. V., Chudova, N. V., Ivanov, A. L. and Kolosnitsyn, V. S. Petroleum Coke as an Active Material of the Negative Electrode for Lithium–Sulfur Batteries. *Electrochemistry*. – 2021. – 57(3). – P. 131–141.
- 3 Tagirov, M. A. Technology for Producing Activated Carbon Material Based on Petroleum Coke. PhD Dissertation. – 2014. – P. 110.
- 4 Ramos Santos, A., da Silva, R. J. and Grillo Reno, M. L. Analysis of Petroleum Coke Consumption in Some Industrial Sectors. *Journal of Petroleum Science Research*. – 2015. – 4(1). – P. 1–7.
- 5 Ozturk, S., Kocaefe, D., Bhattacharyay, D., Kocaefe, Y. and Morais, B. Modification of coke by different additives to improve anode properties. *Fuel*. – 2018. – 211. – P. 102–109.
- 6 Birghila, S., Popovici, I. C., and Dumitru, A. Study on physical-chemical properties of petroleum cokes. *Romanian Journal of Physics*. – 2011. – 56(7). – P. 976–82.
- 7 Heintz, E. A. The characterization of petroleum coke. *Carbon*. – 1996. – 34(6). – P. 699–709.
- 8 Daribekov, S. S. Current state of development of the metallurgical industry in Kazakhstan. *Buketov Business Review*. – 2017. – 85(1). – P. 109–117.

9 **Baisanov, S. O., Tolokonnikova, V. V., Narikbaeva, G. I., Korsukova, I. Ya. and Vorobkalo, N. R.** Development of theoretical foundations of low-percentage ferrotitanium production technology using ferrosilicoaluminum. *Teplofizika Vysokikh Temperatur.* – 2022. – 60(6). – P. 844-849.

10 **Zhakan, A. M., Kabyllanov, S. K., Burumbayev, A. G. and Sadyk, Zh. O.** Investigation of the electrical resistivity of high-ash coals for the production of complex ferroalloys. *Bulletin of Aktobe Regional University named after K. Zhubanov.* – 2025. – 1(79).

11 **Burumbayev, A., Akhmetov, A., Zhakan, A., Myngzhassar, Ye. and Yucel, O.** Research of the electrical resistance of charge materials for the synthesis of silicon carbide. *Kazakhstan Science and Technology.* – 2025. – No. 3. – P. 236.

12 **Makhambetov, E., Abdirashit, A., Kuatbai, E., Yucel, O. and Tajiev, E.** Investigation of the electrophysical properties of raw materials for melting aluminosilicomanganese complex alloys. *Engineering Journal of Satbayev University.* – 2022. – 144(2). – P. 15–21.

13 **Zhuchkov, V. I., Mikulinsky, A. S.** Methodology for determining the electrical resistivity of materials and charges. *Experimental Techniques and Methods of High-Temperature Measurements.* Moscow. – 1966. – P. 43–46.

Received 04.12.25.

Received in revised form 08.12.25.

Accepted for publication 03.03.26.

*А. Г. Бурумбаев¹, Е. Н. Махамбетов², Ж. О. Садық³, *Н. Ә. Уахит⁴*

^{1,2,3}Ж.Әбішев атындағы Химия-металлургия институты,

Қазақстан Республикасы, Қарағанды қ.

¹Қарағанды техникалық университеті,

Қазақстан Республикасы, Теміртау қ.

⁴Торайғыров университеті, Қазақстан Республикасы, Павлодар қ.

04.12.25 ж. баспаға түсті.

08.12.25 ж. түзетулерімен түсті.

03.03.26 ж. басып шығаруға қабылданды.

КҮЙДІРІЛГЕН МҰНАЙ КОКСЫНЫҢ МЕНШІКТІ ЭЛЕКТРЛІК КЕДЕРГІСІН ЗЕРТТЕУ

Күйдірілген кокс анод блоктарын алу үшін қолданылады, олар түсті металдарды балқытуға арналған электролиттік ұяшықтарда, болат, ферроқорытпалар және графит өнімдерін балқытуға

арналған доғалық пештерге арналған электродтарды өндіруде қолданылады. Бұл жұмыста мұнай коксын күйдіру қондырғысында шығарылған күйдірілген мұнай коксының меншікті электр кедергісі (МЭК) зерттелді. Өлшеулер В. И. Жучков әдісі бойынша жоғары температуралы Тамман зертханалық кедергі пешін пайдалана отырып жүргізілді. Зерттеулер үшін кокс алдын ала ұсақталып, +3 мм және -5 мм ірілікке сұрыпталды, зерттелетін қабат қалыңдығы 30 мм құрады. Зерттеу температурасының диапазоны 25–1500 °C құрады. Температураның өсуімен кокстың меншікті электр кедергісі 25 °C -та 761 мкОм×м-ден 1500 °C -та 536 мкОм×м-ге дейін төмендейтіні анықталды, бұл 29 %-дан астам төмендеуге сәйкес келеді. Алынған нәтижелер күйдірілген мұнай коксының жоғары электрокернеулігі мен термиялық тұрақтылығын растайды, бұл оны жоғары температуралы электротермиялық және металлургиялық үрдістерде қолдануға ұсынуға мүмкіндік береді.

Кілтті сөздер: меншікті электрлік кедергі, күйдірілген мұнай коксы, температура, кедергілі пеш, В. И. Жучков әдісі.

*А. Г. Бурумбаев¹, Е. Н. Махамбетов², Ж. О. Садық³, *Н. Ә. Уахит⁴*

^{1,2,3}Химико-металлургический институт имени Ж. Абишева,

Республика Казахстан, г. Караганда;

¹Карагандинский индустриальный университет,

Республика Казахстан, г. Темиртау;

⁴Торайғыров университет, Республика Казахстан, г. Павлодар.

Поступило в редакцию 04.12.25

Поступило с исправлениями 08.12.25.

Принято в печать 03.03.26.

ИССЛЕДОВАНИЕ УДЕЛЬНОГО ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО СОПРОТИВЛЕНИЯ ПРОКАЛЕННОГО НЕФТЯНОГО КОКСА

Прокаленный кокс используется для изготовления предварительно обожженных анодных блоков, которые применяются в электролизерах для плавки цветных металлов, электродов для дуговых печей для выплавки стали, ферросплавов, а также графитовых изделий. В данной работе исследовано удельное электрическое сопротивление (УЭС) прокаленного нефтяного кокса, произведенного на установке прокали нефти кокса. Измерения проводились по методу

В. И. Жучкова с использованием лабораторной высокотемпературной печи сопротивления Таммана. Для эксперимента кокс был предварительно дроблен и отсортирован по фракциям +3 мм и – 5 мм, толщина исследуемого слоя составляла 30 мм. Температурный диапазон исследования составил 25–1500 °С. Установлено, что с повышением температуры удельное электрическое сопротивление кокса снижается с 761 мкОм×м при 25 °С до 536 мкОм×м при 1500 °С, что соответствует снижению более чем на 29%. Полученные результаты подтверждают высокую электропроводность и термическую устойчивость прокаленного нефтяного кокса, что позволяет рекомендовать его для использования в высокотемпературных электротермических и металлургических процессах.

Ключевые слова: удельное электрическое сопротивление, прокаленный нефтяной кокс, температура, печь сопротивления, метод В. И. Жучкова.

МРНТИ 44.31.31

<https://doi.org/10.48081/BGQF1946>**А. А. Генбач¹, *Д. Ю. Бондарцев², А. А. Генбач³**^{1,2}Алматинский Университет Энергетики и Связи

имени Г. Даукеева, Республика Казахстан, г. Алматы

³ГБПОУ МО Можайский техникум, Российская Федерация, г. Москва¹ORCID: <https://orcid.org/0009-0001-3819-4387>²ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-8778-7851>³ORCID: <https://orcid.org/0009-0004-1255-6230>*e-mail: d.bondartsev@aues.kz

ТЕПЛОТЕХНИЧЕСКИЙ ПОТЕНЦИАЛ ПОКРЫТИЙ НА ОСНОВЕ ПРИРОДНЫХ МАТЕРИАЛОВ

Исследованы материалы (кварциты, граниты, тешениты, туфы, мраморы), для создания системы охлаждения с высокими теплопередающими характеристиками. Нелинейная механика разрушения на основе предельного состояния объяснила экспериментальные результаты, а оптические методы – раскрыли физические механизмы разрушения капиллярно-пористых покрытий. Изучены процессы нанесения напыления покрытий минеральных сред детонационным факелом на металлическую поверхность с помощью созданного термоинструмента. Получен интегральный (синергический) теплообмен структур и покрытий в поле массовых и капиллярных сил. Рассмотрены унифицированные термоинструменты, использующие керосино-кислородные, так и бензо(керосино)-воздушные окислители, что важно для нанесения упругих и вязких материалов с целью проведения режимов без оплавления, с оплавлением и плавлением покрытий. Изучен эффект размера, когда диаметр частиц может быть меньше или более толщины покрытия. Исследования проводились для разного подбора компонентов горючего и окислителя в струе и на покрытии. Предлагаемые теплозащитные покрытия из природных минеральных сред, включая многослойные системы (где внешний слой работает при более высоких температурах, а оптимизированные сетчатые структуры служат внутренним охлаждающим слоем), представляют собой интегрированную и многофункциональную защитную систему для теплонагруженных элементов энергоустановок.

Ключевые слова: природные материалы, покрытия, кризис теплообмена, термоинструмент, детонационный факел.

Введение

Актуальным является создание высокофорсированной системы охлаждения в области двигателестроения, выполненной с помощью покрытий из естественных материалов [1]. Особый интерес представляют поршневые двигатели внутреннего сгорания, в которых изменение плотности суммарного (конвективного и лучистого) теплового потока по углу поворота коленчатого вала в камере сгорания имеют циклический характер. Наличие капиллярно-пористой структуры (КПС) [2] и капиллярно-пористого покрытия (КПП) [3] в системе охлаждения за счет самонастройки капиллярными силами позволяют эффективно приспосабливаться к таким изменениям. Отвод тепловых потоков может достигать $(2.5 \div 3) \times 10^6$ Вт/м² в камере сгорания четырехтактного и быстроходного двигателей. Так, для крышки цилиндров и для гильзы цилиндров применяется поверхностное и развитое пузырьчатое кипение на гладкой поверхности, т.е. без пористых покрытий, и не может стабилизировать и управлять теплообменном с помощью действия массовых и капиллярных полей.

Исследовалось [4] медное покрытие толщиной $(19, 26, 33, 41 \text{ и } 60) \times 10^{-6}$ м под атмосферным давлением насыщенной воды на обогреваемых трубках. Интенсификация теплообмена имела место до некоторого оптимального значения толщины покрытия. Однако в случае образования пузырьков наступал предельный теплообмен.

Применялось покрытие из медной сетки, изготовленное спеканием [5]: при образовании пузырьков, как и в [4], наступал кризис теплообмена в зависимости от толщины покрытия, пористости и гидравлического размера пор покрытия.

Изучена теплопередача испарением жидкости в спеченных медных покрытиях [6]. Как и в работах [4; 5] обнаружен предельный теплообмен, но путем решения двумерной задачи при численном моделировании без экспериментального подтверждения.

В сетчатом покрытии [7] при действии только капиллярных сил в случае закипания жидкости наступало предельное состояние. Сильное влияние оказывала величина размера пор, тогда как пористость почти не влияла на кризис. Однако влияние массовых сил не рассматривалось.

Исследовались структурированные покрытия при кипении в большом объеме воды под атмосферным давлением [8]. Максимальный тепловой поток

достигал 2.5×10^5 Вт/м² для канавчатого покрытия под углом 60 градусов, что явно недостаточно для форсированных режимов теплообмена.

Интенсифицировали теплообмен в микропористых покрытиях диэлектрической жидкости для кремневого чипоподобного нагревателя, причем коэффициент теплоотдачи увеличивался за счет переохлаждения всего на 60 %, а затем наступал кризис кипения [9].

В работе [10] увеличение теплообмена достигалось за счет переохлажденной воды под атмосферным давлением в кипящем потоке на поверхности покрытия, причем оно имело место на 25% большее для микропористых покрытий из окиси алюминия с размером пор менее 10×10^{-6} м и толщиной 50×10^{-6} м, чем с нанопористыми покрытием. Причиной кризиса явилось образование пузырьков в порах покрытия.

Увеличился вдвое теплообмен [11] за счет применения кипящего ядра потока жидкости на тонкопленочных никелевых покрытиях наночастиц кремнезема.

Таким образом, в работах [4; 5; 6; 7; 8; 9; 10; 11] в покрытиях наступило предельное состояние даже при умеренных тепловых нагрузках за счет закупорки пузырьками пор покрытий несмотря на то, что использовался недогрев и повышенная скорость ядра потока. Не использовались другие поля в комбинации с капиллярными силами, не изучался механизм поведения пузырей в порах покрытия [1; 2; 3]. В качестве покрытий применялись металлы и их сплавы. Не рассматривались природные материалы для покрытий, например естественные минеральные среды, что предлагается рассмотреть в данной работе.

Материалы и методы

Использовался метод голографической интерферометрии. Изучалось напряженное и деформированное состояние образцов. Деформации образцов регистрировались в реальном масштабе времени (рис. 1) [2].

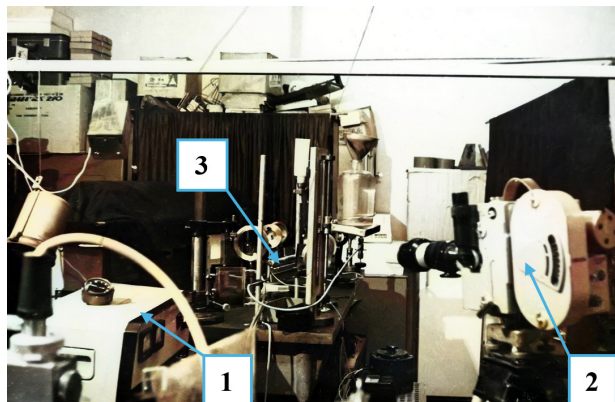


Рисунок 1 – Стенд для изучения теплообмена и термомеханических напряжений и деформаций в покрытиях из природных материалов:
1 – лазер ЛГ-38, 2 – кинокамера СКС-1М, 3 – покрытие

Расшифровка голографических интерферограмм производилась по принятой методике. Определялось направление вектора смещения. В опытах измерялись тепловые потоки, температуры, расходы, давления потоков жидкости и газа. Методика измерения рассматривалась в [2; 3].

На рисунке 2 представлен керосино – кислородный термоинструмент для нанесения напылением покрытий из природных материалов с помощью детонационного высокотемпературного факела, истекающего из сверхзвукового сопла.

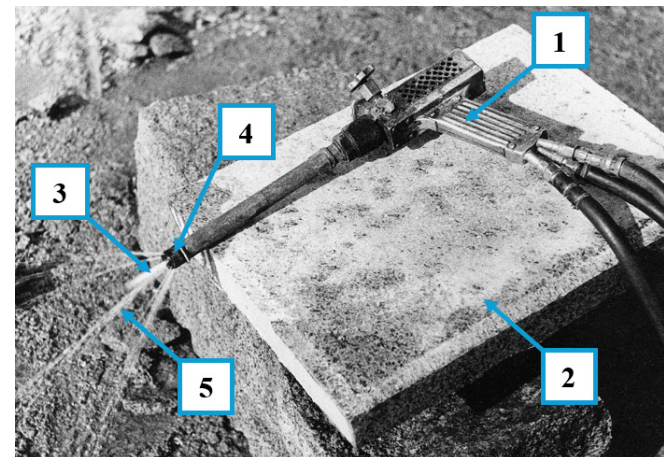


Рисунок 2 – Термоинструмент 1 расположен на обработанном гранитном покрытии 2 с микрофакелом для запуска 3 истекающего из сверхзвукового сопла 4. Струи воды 5 носят технологическое значение

Коэффициент избытка окислителя изменялся в пределах $0.3 \div 0.8$. Гранулометрический состав материала представлены на рисунке 3.

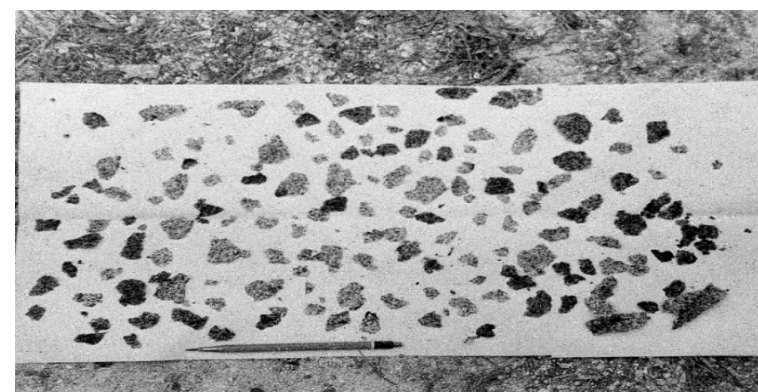


Рисунок 3 – Гранулометрический состав гранита (продукт разрушения), полученный при обработке массива с помощью термоинструмента, показанного на рис. 2

Частицы отобраны по крупности в мм (у) и в процентах по весу (у/), представлены на рисунке 4.

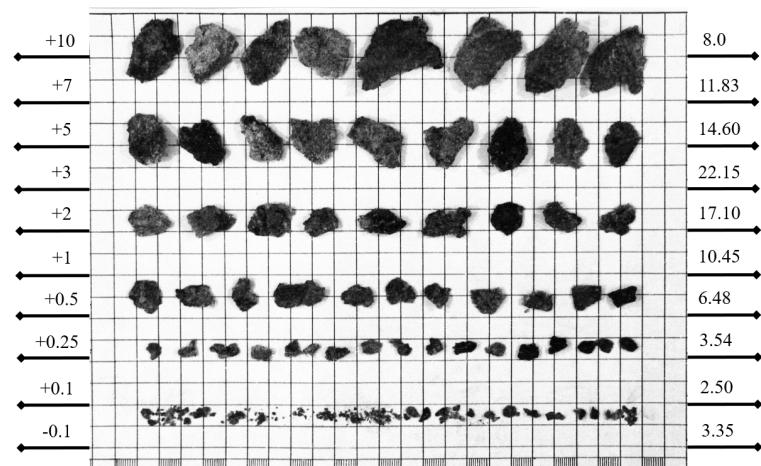


Рисунок 4 – Отбор частиц гранита для напыления на металлическую подложку (медь М2 и нержавеющей сталь 1Х18Н9Т).

Частицы отбирались по крупности:
 0.1×10^{-3} м (2.9 %); 0.25×10^{-3} м (3.8 %); 0.5×10^{-3} м (7.1 %)

Установлена спиновая детонация в смеси продуктов сгорания керосин – кислород термоинструмента. За счет укороченного сопла Лавалья увеличение скорости пламени дает взрыв продуктов сгорания с окислителем в волне сжатия перед покрытием.

Нестационарный процесс горения керосина способствует образованию детонации. Ударные волны, опережающие волны сжатия газов, отражаясь от покрытия, усиливают процесс детонации в факеле. Пульсирующий двухфазный факел стабилен, происходит непрерывный процесс его торможения о покрытие в виде сверхзвукового высокотемпературного потока горящей смеси.

Поперечная скорость участков воспламенения близка к скорости детонации и почти вдвое выше скорости звука в сгоревшем газе. Такая волна совершала от семи до девяти полных оборотов (см. рис. 5).

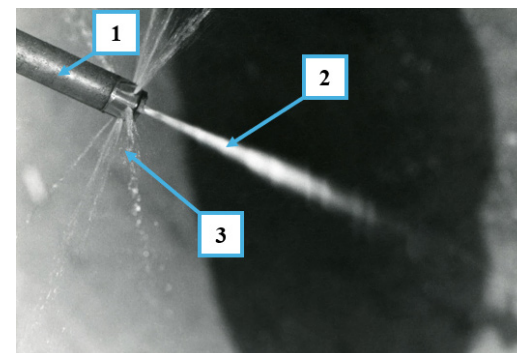


Рисунок 5 – Термоинструмент 1 в рабочем детонационном режиме.

Факел 2 представлен в виде сверхзвуковой высокотемпературной пульсирующей струи. Струйки воды 3 имеют технологическое значение.

Работает на компонентах: керосин – кислород

Спиновая детонация позволяет получать удельные тепловые потоки в два-шесть раз больше, чем при напылении при той же температуре факела на покрытие. Это дает возможность напылять порошки крепких малопористых пород без оплавления, а для высокопористых пород (туф) – производить напыление с оплавлением покрытия.

Результаты и обсуждение

Голографические интерферограммы показывают (рис. 6), что разрушение капиллярно-пористого материала следует ожидать, когда микротрещины сосредотачиваются вдоль возникающей зоны разлома. После этого состояния трещина переходит к своему критическому размеру и разрушению покрытия.

Время, τ	Материал природного покрытия		
	Туф ($q = 2.1 \times 10^6 \text{ Вт/м}^2$)	Гранит ($q = 1 \times 10^6 \text{ Вт/м}^2$)	Мрамор ($q = 1 \times 10^6 \text{ Вт/м}^2$)
τ = 6 секунд			
τ = 12 секунд			
τ = 18 секунд			
τ = 24 секунд			
τ = 30 секунд			
τ = 36 секунд			
τ = 42 секунд			
τ = 48 секунд			
τ = 54 секунд			
τ = 60 секунд			

Рисунок 6 – Голографические интерферогаммы природных покрытий

Для познания механизма разрушения покрытия также привлекались скоростная киносъемка СКС-1М, другой глубинный метод познания – фотоупругость и аналитическое решение задачи термоупругости [2]. Разрушение покрытия в виде появившейся каверны наблюдалось на месте [1].

С помощью голографической интерферометрии построены графики деформаций и перемещений [3]. Также малые термические нагружения являются предвестником отказа покрытия, вызывают местные разрушения, что является прогрессирующим фактором, а предварительные повреждения

концентрируются в локальных зонах деформаций. Возникающий разрыв покрытия фиксируется оптическими методами.

Модели расчета [3] закладывают интегральные значения и не могут предвидеть местные разрушения. Оптические методы прогнозируют надежность работы покрытия. На интерферограммах в виде концентрации линий эти процессы включают уплотнения, схлопывание пор, развитие микротрещин растяжения, сдвиг слоев, сжатия и ориентированы по направлению максимальному термическому напряжению. Оптические методы позволяют изучить отказ, контролируют скорость нагружения удельного теплового потока от секунд до часов, приводя требуемый и детальный анализ событий разрыва покрытия.

Влияние угла атаки струи с поверхностью, результаты и обсуждение. Интенсивность разрушения капиллярно-пористых покрытий (КПП) зависит от угла встречи (атаки) струи с поверхностью (см. рис. 7).

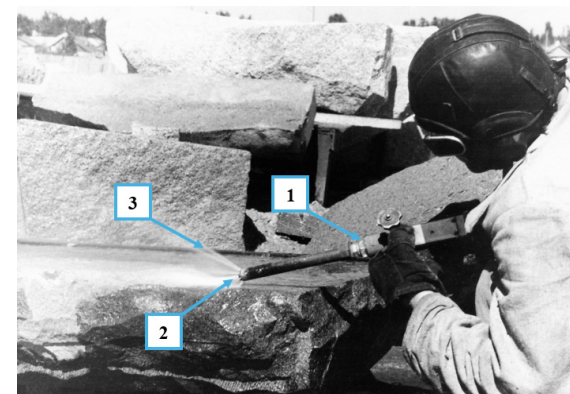


Рисунок 7 – Термоинструмент 1 в детонационном режиме работы.

Взаимодействие факела 2 с гранитным покрытием.

Вода 3 предназначена для охлаждения и технологических целей

Величина удельного конвективного теплового потока при вынужденном движении газа с учетом изменения теплофизических характеристик его с температурой:

$$q = \alpha_i \cdot (i_z - i_w), \text{ Вт/м}^2 \quad (1)$$

где i_z – энтальпия восстановления газа, кДж/кг; i_w – энтальпия при температуре газа на поверхности, кДж/кг; α_i – энтальпийный коэффициент теплопередачи, кг/(с · м²).

Величина также равна:

$$q = \alpha_i \cdot g \cdot C_p \cdot (T_z - T_w) = \alpha \cdot (T_z - T_w), \text{ Вт/м}^2 \quad (2)$$

где $\alpha = \alpha_i \cdot g \cdot C_p$ – коэффициент теплоотдачи между газом и поверхностью тела, Вт/(м²К); T_z – температура восстановления газового потока, К; T_w – температура поверхности тела, К; C_p – изобарная теплоемкость газа, кДж/(кг · К).

Число Стэнтона:

$$St = \frac{\alpha_i}{\rho_\delta \cdot \vartheta_\delta},$$

где ρ_δ – плотность газа на внешней границе пограничного слоя, кг/м³; ϑ_δ – скорость газа на внешней границе пограничного слоя, м/с. Индекс « δ » означает внешнюю границу пограничного слоя. Связь числа St с локальным коэффициентом трения C'_t :

$$St = \frac{C'_t}{2 \cdot Pr^{\frac{1}{3}}}$$

Для ламинарного пограничного слоя:

$$C'_t = 0.664 \cdot Re^{-\frac{1}{2}}.$$

Для турбулентного пограничного слоя:

$$C'_t = 0.664 \cdot Re^{-\frac{1}{2}}.$$

Здесь:

$$Pr = \frac{g \cdot C_p \cdot \mu}{\lambda}, Re = \frac{\vartheta \cdot l \cdot \rho}{\mu},$$

где μ – коэффициент вязкости газа, Па·с; λ – коэффициент теплопроводности газа, Вт/(м·К); g – ускорение свободного падения, м/с²; l – размер, м. Величины Re , Pr , μ , ρ , λ определяются средней эффективной температурой T^* . Для дозвукового потока:

$$T^* = 0.5 \cdot (T_w + T_\delta).$$

Для сверхзвукового потока:

$$T^* = T_0 \cdot \left[1 + 0.031 \cdot \mu_\delta^2 + 0.58 \cdot \left(\frac{T_w}{T_0} - 1 \right) \right].$$

Вязкость газа:

$$\mu = \mu_0 \cdot \left(\frac{T}{T_0} \right)^n$$

Конвективный тепловой поток от газа к поверхности:

$$q = C_p \cdot g \cdot \rho \cdot V_\delta \cdot St \cdot \left[T_\delta \cdot \left(1 + \frac{K-1}{2} \cdot r \cdot \mu_\delta^2 \right) \cdot T_w \right] \quad (3)$$

где r – коэффициент восстановления; $r = \sqrt{Pr}$ – для ламинарного пограничного слоя; $r = \sqrt[3]{Pr}$ – для турбулентного пограничного слоя.

При соприкосновении сверхзвуковой струи с поверхностью тела образуется косой скачок уплотнения с углом β к поверхности, при прохождении через который температура, скорость, давление и другие физические свойства потока изменяются и зависят от угла встречи (атаки) струи с поверхностью тела δ . Угол δ будет оптимальный, когда выражение $q \cdot \sin \delta$ достигает максимума (см. рис. 8).

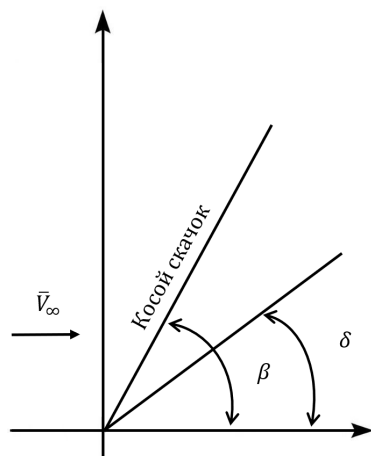


Рисунок 8 – Пояснение к косому скачку уплотнения
Зависимости газовой динамики имеют вид:

$$\rho_{\delta} = \rho_{\infty} \cdot \frac{\operatorname{tg} \beta}{\operatorname{tg} \cdot (\beta - \delta)},$$

$$V_{\delta} = V_{\infty} \cdot \frac{\cos \beta}{\cos \cdot (\beta - \delta)},$$

$$Re = \frac{V_{\delta} \cdot l \cdot \rho_{\delta}}{\mu}.$$

Из выражения (3) следует, что $\delta = f(\mu, \beta)$, а $\delta_{\text{опт}} = f(\mu)$, см. таблицу 1.

Таблица 1 – Определение величины .

μ	δ_{max} , град	$\delta_{\text{опт}}$, град
3.16	42	40
2.24	31	30
1.7	19	18
1	0	0

Приблизенно угол δ равен $\delta = 80 \lg \mu$ для $K = 1.2$ (коэффициент адиабаты) и $n = 0.8$. Регулирование углом наклона струи к покрытию представлено в таблице 2.

Таблица 2 – Зависимость α/α_{90° от δ .

α/α_{90°	1	1.1	1	0.8	0.5	0.35	0.3	0.25
δ , град.	90	80 – 75	60	50	30	20	10	0

В таблице 2 принято: δ – угол оси горелки к покрытию, град; $\alpha_{90^\circ} = 1000 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К})$; $T_{\text{ст}}^* = 3500 \text{ }^\circ\text{C}$; $t_{\text{п}} = 300 \text{ }^\circ\text{C}$; $P_z = 1 \text{ МПа}$.

Удельный тепловой поток q быстро возрастает с увеличением угла δ и достигает максимума при $\delta = \delta_{\text{опт}}$, после чего резко уменьшается, так как при углах δ , несколько больших оптимальных значений, после косого скачка устанавливается дозвуковая скорость и теплообмен ухудшается.

Поэтому капиллярно-пористые покрытия будут испытывать наибольшие нагрузки q при $\delta = \delta_{\text{опт}}$ для соответствующего числа μ , а облегченные условия теплообмена обеспечиваются в зоне после скачка уплотнения, что даст сохранение среднего на уровне, далеко от его максимального значения.

Выводы

Нами показано, что на интерферограммах, за счет новой системы охлаждения с пористыми покрытиями из природных материалов уменьшается в покрытиях риск развития трещин. Модели расчета закладывают интегральные значения и не могут предвидеть местное разрушение. Оптические методы прогнозируют надежность работы покрытия. Интерферограммы показывают концентрацию деформаций, перемещений и термических напряжений в массиве при тепловых нагрузках до $4.2 \times 10^6 \text{ Вт}/\text{м}^2$. Термоинструменты эффективны для выполнения реконструкции железобетонных конструкций, при этом соблюдается условия охраны окружающей среды и уменьшения расхода воды. За счет спиновой детонации факела напыление порошков крепких пород происходит без оплавления. Исследован оптимальный угол встречи струи с покрытием в зависимости от числа Маха. Малые термические нагружения являются предвестниками отказа покрытия, который прогнозируется оптическим методом и контролируется от секунд до часов.

Список использованных источников

- 1 Genbach, A. A., Bondartsev, D. Yu., Genbach, N. A., & others. Experimental studies of natural material-based coatings for thermal protection of metallic surfaces // Journal of Materials Science: Materials in Engineering: 2025, Vol. 20. – P. 46. – <https://doi.org/10.1186/s40712-025-00252-5>
- 2 Genbach, A. A., Bondartsev, D. Yu., Beloiev, H. I., & others. Boiling crisis in porous structures // Energy: 2022, Vol. 259. – P. 125076. – <https://doi.org/10.1016/j.energy.2022.125076>
- 3 Genbach, A., Beloiev, H., Bondartsev, D. Comparison of cooling systems in power plant units // Energies: 2021. – Vol. 14. – P. 6365. – <https://doi.org/10.3390/en14196365>
- 4 Siraj, M. A., Prasad, L., Gupta, S. C., Agarwal, V. K. Enhanced boiling of saturated water on copper coated heating tubes // Chemical Engineering and Processing: Process Intensification: 2001. – Vol. 47. – P. 159–167. – <https://doi.org/10.1016/j.ccep.2007.07.021>
- 5 Li, C., Peterson, G. P., Wang, Y. Evaporation/Boiling in Thin Capillary Wicks (I) – Wick Thickness Effects // Journal of Heat Transfer: 2006. – Vol. 128. – P. 1312–1319. – <https://doi.org/10.1115/1.2349507>
- 6 Hanlon, M. A., Ma, H. B. Evaporation Heat Transfer in Sintered Porous Media // Journal of Heat Transfer: 2003. – Vol. 125, P. 644–652. – <https://doi.org/10.1115/1.1560145>
- 7 Li, C., Peterson, G. P. Evaporation/Boiling in Thin Capillary Wicks (II) - Effects of Volumetric Porosity and Mesh Size // Journal of Heat Transfer: 2006, Vol. 128. – P. 1320–1328. – <https://doi.org/10.1115/1.2349508>
- 8 Das, A. K., Das, P. K., Saha, P. Performance of different structured surfaces in nucleate pool boiling // Applied Thermal Engineering: 2009. – Vol. 29. – P. 3643–3653. – <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2009.06.020>
- 9 Arik, M., Bar-Cohen, A., You, S. M. Enhancement of pool boiling critical heat flux in dielectric liquids by microporous coatings // International Journal of Heat and Mass Transfer: 2007. – Vol. 50. – P. 997–1009. – <https://doi.org/10.1016/j.ijheatmasstransfer.2006.08.005>
- 10 Sarwar, M. S., Jeong, Y. H., Chang, S. H. Subcooled flow boiling CHF enhancement with porous surface coatings // International Journal of Heat and Mass Transfer: 2007. – Vol. 50. – P. 3649–3657. – <https://doi.org/10.1016/j.ijheatmasstransfer.2006.09.011>
- 11 Forrest, E. Augmentation of nucleate boiling heat transfer and critical heat flux using nanoparticle thin-film coatings // International Journal of Heat

and Mass Transfer: 2010. – Vol. 53. – P. 58–67. – <https://doi.org/10.1016/j.ijheatmasstransfer.2009.10.008>

Поступило в редакцию 07.10.25.

Поступило с исправлениями 11.11.25.

Принято в печать 03.03.26.

А. А. Генбач¹, *Д. Ю. Бондарцев², А. А. Генбач³

^{1,2}Ғ. Даукеев атындағы Алматы Энергетика және Байланыс Университеті, Қазақстан Республикасы, Алматы қ.

³Можайский техникумы, Ресей Федерациясы, Мәскеу қ.

07.10.25 ж. баспаға түсті.

11.11.25 ж. түзетулерімен түсті.

03.03.26 ж. басып шығаруға қабылданды.

ТАБИҒИ МАТЕРИАЛДАР НЕГІЗІНДЕГІ ҚАПТАМАЛАРДЫҢ ЖЫЛУ-ТЕХНИКАЛЫҚ ӘЛУЕТІ

Жоғары жылуөткізгіштік сипаттамалары бар салқындату жүйесін жасау мақсатында материалдар (кварциттер, граниттер, тешениттер, туфтар, мәрмәрлер) зерттелді. Шекті күйге негізделген сызықтық емес бұзылу механикасы эксперименттік нәтижелерді түсіндірсе, оптикалық әдістер капиллярлы-кеуекті қаптамалардың бұзылу физикалық механизмдерін ашты. Жасалған термоқұралды пайдалана отырып, минералды орта қаптамаларын метал бетіне детонациялық алаумен бүрку процестері зерттелді. Масса мен капиллярлық күштер өрісінде құрылымдар мен қаптамалардың интегралды (синергиялық) жылуалмасуы алынды. Бірыңғай термоқұралды қарастырылды, олар керосин–оттекті және бензин(керосин)–ауа тотықтырғыштарын қолданады, бұл серпімді және тұтқыр материалдарды балқымай, беткі балқу немесе толық балқу режимдерінде қаптау үшін маңызды. Бөліктер диаметрі қаптаманың қалыңдығынан кіші немесе үлкен болатын өшем әсері зерттелді. Зерттеулер жанармай мен тотықтырғыш компоненттерінің әртүрлі құрамдары үшін ағын мен қаптамада жүргізілді. Ұсынылып отырған табиғи минералды ортадан жасалған жылуқорғағыш жабындар, соның ішінде көпқабатты жүйелер (мұнда сыртқы қабат жоғары температурада жұмыс істейді, ал оңтайландырылған торлы құрылымдар ішкі салқындатқыш қабат

қызметін атқарады), энергия қондырғыларының жылу жүктемесі жоғары элементтері үшін интеграцияланған әрі көпфункционалды қорғаныс жүйесін құрайды.

Кілтті сөздер: табиғи материалдар, қаптамалар, жылуалмасу дағдарысы, термоқұрал, детонациялық алау.

A. A. Genbach¹, *D. Yu. Bondartsev², A. A. Genbach³

^{1,2}Almaty University of Power Engineering and Telecommunications named after G. Daukeev, Republic of Kazakhstan, Almaty;

³Mozhaisky Technical College, Russian Federation, Moscow.

Received 07.10.25.

Received in revised form 11.11.25.

Accepted for publication 03.03.26.

THERMAL PERFORMANCE POTENTIAL OF COATINGS BASED ON NATURAL MATERIALS

The materials (quartzites, granites, teshenites, tuffs, marbles) were studied for the development of a cooling system with high heat transfer characteristics. Nonlinear fracture mechanics based on the ultimate state explained the experimental results, while optical methods revealed the physical mechanisms of fracture of capillary-porous coatings. The processes of depositing mineral medium coatings by detonation flame spraying onto a metal surface using the developed thermo-tool were investigated. An integral (synergistic) heat exchange of structures and coatings in the field of mass and capillary forces was obtained. Unified thermo-tools employing kerosene–oxygen and gasoline (kerosene)–air oxidizers were considered, which is important for applying elastic and viscous materials under regimes without melting, with surface melting, and with complete melting of coatings. The size effect was studied, when the particle diameter may be smaller or larger than the thickness of the coating. The research was carried out for different selections of fuel and oxidizer components in the jet and on the coating. The proposed thermal protection coatings made from natural mineral media, including multilayer systems (where the outer layer operates at higher temperatures and optimized mesh structures serve as an internal cooling layer), represent an integrated and multifunctional protection system for heat-loaded components of power units.

Keywords: natural materials, coatings, heat transfer crisis, thermo-tool, detonation flame.

FTAMP 44.41.35

<https://doi.org/10.48081/BGQF1947>

A. M. Даулетханова¹, Е. Т. Ербаев², *С. А. Минажова³,
А. П. Садвакасова⁴, Д. Д. Тананова⁵

¹Қ. И. Сәтбаев атындағы Қазақ ұлттық зерттеу техникалық университеті, Қазақстан Республикасы, Алматы қ.;

²«Жәңгір хан атындағы Батыс Қазақстан аграрлық-техникалық университеті, Қазақстан Республикасы, Орал қ.;

^{1,3,5}«QazNRG Group» ЖШС, Қазақстан Республикасы, Алматы қ.;

⁴Алматы қаржы-экономикалық колледжі, Қазақстан Республикасы, Алматы қ.

¹ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-3459-6167>

²ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-3186-9994>

³ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-5461-2251>

⁴ORCID: <https://orcid.org/0009-0004-3409-8680>

⁵ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-1175-8525>

*e-mail: s.minazhova@satbayev.university

ЖАСАНДЫ ИНТЕЛЛЕКТ НЕГІЗІНДЕГІ КҮН БАҒЫТЫН БАҚЫЛАУ ЖҮЙЕСІН ӘЗІРЛЕУ ЖӘНЕ ТАЛДАУ

Бұл мақалада күн энергиясын жинау тиімділігін арттыру мақсатында жасанды интеллектке негізделген күн бағытын бақылау (трекинг) жүйесін әзірлеу және оның жұмыс өнімділігін талдау мәселесі қарастырылған. Қазіргі таңда жаңартылатын энергия көздерін тиімді пайдалану – әлемдік энергетика саласының басты бағыттарының бірі. Сол себепті күн панельдерінің тиімді жұмыс істеуін қамтамасыз ету үшін олардың Күннің қозғалысын дәл қадағалауы үлкен маңызға ие. Зерттеу барысында күн сәулесінің нақты уақыттағы бағытын анықтап, панельдерді сол бағытқа бұру үшін терең нейрондық желілер, компьютерлік көру және машиналық оқыту әдістері қолданылды. Ұсынылған интеллектуалды жүйе күн сәулесінің қарқындылығы, ауа райының өзгеруі, температура, панельдердің орналасу бұрышы мен географиялық координаттар сияқты параметрлерді ескере отырып, күн панельдерінің жұмысын үздіксіз оңтайландырады. Алынған нәтижелерге сәйкес, жасанды интеллект негізінде басқарылатын трекинг жүйесі дәстүрлі стационарлық және механикалық трекерлермен салыстырғанда

электр энергиясын өндіру көлемін 20–30%-ға дейін арттыруға мүмкіндік берді. Сонымен қатар, жүйе автоматты режимде жұмыс істеп, энергия шығынын азайтып, техникалық қызмет көрсету шығындарын төмендетеді. Бұл зерттеу нәтижелері жасанды интеллект технологияларын күн энергетикасы саласында енгізудің болашағы зор екенін, экологиялық тұрақтылық пен энергия тиімділігін арттырудағы рөлін айқын көрсетеді. Жасанды интеллектке негізделген күн бағытын бақылау жүйелері Қазақстан жағдайында да жаңартылатын энергия көздерін дамытуға елеулі үлес қоса алады.

Кілтті сөздер: Күн энергиясы, жасанды интеллект, күн бағытын бақылау жүйесі, нейрондық желілер, энергия тиімділігі.

Кіріспе

Бүгінгі таңда жаһандық энергетикалық дағдарыс пен қоршаған ортаға деген теріс әсердің артуына байланысты жаңартылатын энергия көздеріне деген сұраныс қарқынды өсуде. Бұл ретте күн энергиясы - қолжетімділігі, экологиялық тазалығы және сарқылмас табиғи ресурс ретінде ерекше маңызға ие. Алайда күн панельдерінің тиімділігі көбінесе күн сәулесінің түсу бұрышына, атмосфералық жағдайларға және панельдердің статикалық орналасуына байланысты шектеледі. Осы себепті күн энергиясын барынша тиімді жинау мәселесі күн тәртібіндегі өзекті ғылыми және инженерлік проблемалардың бірі болып отыр [1].

Күн панельдерінің сәулені тиімді сіңіруі үшін оларды күннің қозғалысына сәйкес бағыттап отыру қажет. Дәстүрлі бақылау жүйелері, мысалы, механикалық немесе сағаттық трекерлер, белгілі бір деңгейде тиімділікке қол жеткізгенімен, олар күрделі техникалық қызмет көрсетуді қажет етеді және жиі климаттық жағдайларға тәуелді болады. Сонымен қатар, мұндай жүйелер нақты уақыттағы өзгерістерге бейімделе алмайды, бұл энергия өндірісін айтарлықтай төмендетеді.

Осы кемшіліктерді жою мақсатында жасанды интеллект (ЖИ) технологияларын қолдану - перспективалық бағыттардың бірі ретінде танылып отыр. ЖИ, әсіресе терең машиналық оқыту, нейрондық желілер және нақты уақыттағы адаптивті басқару жүйелері күн бағытын дәл әрі тиімді анықтауға мүмкіндік береді. Бұл технологиялар күн панельдерінің жұмысын автоматты түрде оңтайландырып, энергия өндірудің жалпы тиімділігін арттыруға ықпал етеді [2].

Аталған зерттеу жұмысы күн панельдеріне арналған жасанды интеллектке негізделген күн бағытын бақылау жүйесін әзірлеуді және оны

талдауды мақсат етеді. Жүйе ауа райының өзгеруі, бұлттылық деңгейі, уақыт және географиялық орналасу секілді факторларды ескере отырып, панельдердің бағытын нақты анықтай алады. Бұл өз кезегінде энергия өндіру көлемін арттыруға, жүйенің өзін-өзі басқаруына және техникалық шығындарды азайтуға жол ашады.

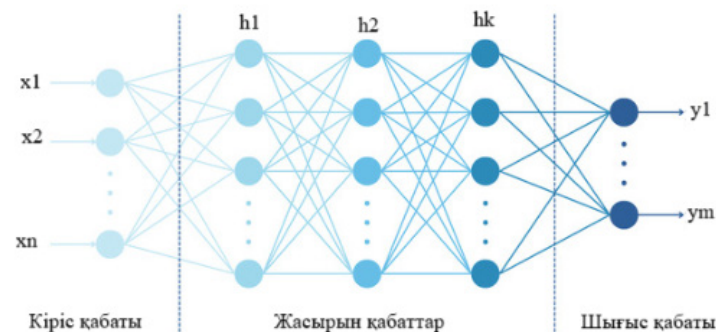
Зерттеу нәтижелері AI (Artificial Intelligence, яғни жасанды интеллект)-негізделген жүйенің дәстүрлі әдістермен салыстырғанда жоғары тиімділік көрсететінін дәлелдей отырып, күн энергетикасы саласында жаңа технологиялық серпіліс жасауға мүмкіндік береді. Бұл жұмыс жаңартылатын энергия көздерін пайдалануды кеңейтуге және энергетикалық тұрақтылықты қамтамасыз етуге бағытталған маңызды қадамдардың бірі болып табылады.

Материалдар мен әдістері

Бұл зерттеуде күн панельдерінің бағытын нақты уақыт режимінде оңтайлы реттейтін, жасанды интеллектке негізделген интеллектуалды бақылау жүйесі жасалды. Жүйе үш негізгі компоненттен тұрады:

Физикалық модуль: күн панелі, сервомоторлар, Arduino немесе Raspberry Pi контроллері;

Сенсорлар жүйесі: жарық қарқындылығын анықтайтын LDR (Light Dependent Resistor) сенсорлары, GPS модулі, ауа температурасы мен ылғалдылық сенсорлары;



1-сурет – Нейрондық желінің құрылымы

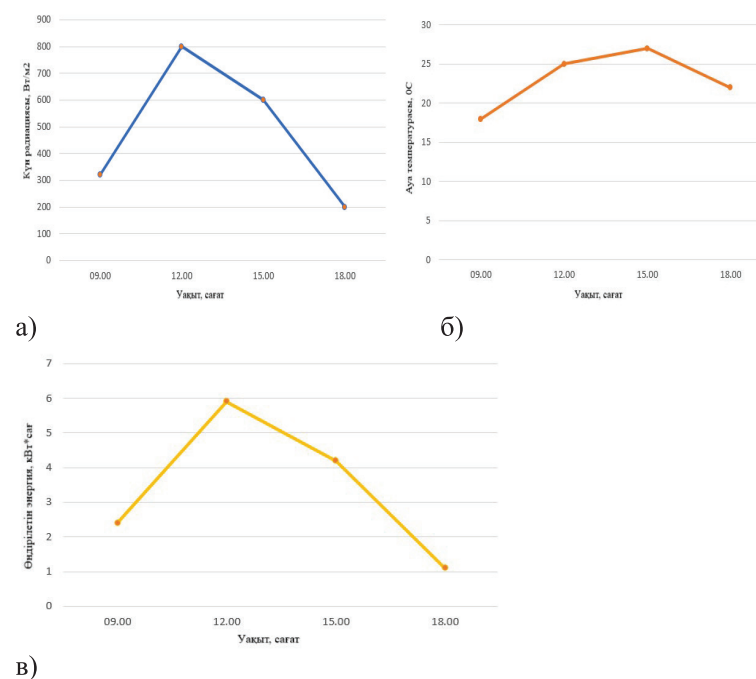
Мұндай желілер жасанды интеллекттің (AI) маңызды бөлігі болып табылады және олар мәліметтерді өңдеп, әртүрлі күрделі міндеттерді шешуге (мысалы, болжау, тану, классификация т.б.) пайдаланылады.

Кіріс қабатында $X_1, X_2, \dots, X_n$ – бұл жүйеге берілетін бастапқы мәліметтер (функциялар немесе белгілер). Ал жасырын қабаттар нейрондық желінің «миы» деп есептеледі. Онда $h_1, h_2, \dots, h_k$ – әр қабаттағы нейрондар, әрбір нейрон алдыңғы қабаттағы барлық нейрондармен байланысқан. Нейрондар арасында салмақтар және активация функциялары болады. Жасырын қабаттар неғұрлым көп болса, желі соғұрлым “терең” деп аталады. Шығыс қабатына келсек, $Y_1, Y_2, \dots, Y_m$ – нейрондық желінің шығаратын нәтижелері. Бұл нәтиже болжам, классификация, немесе сандық мән болады.

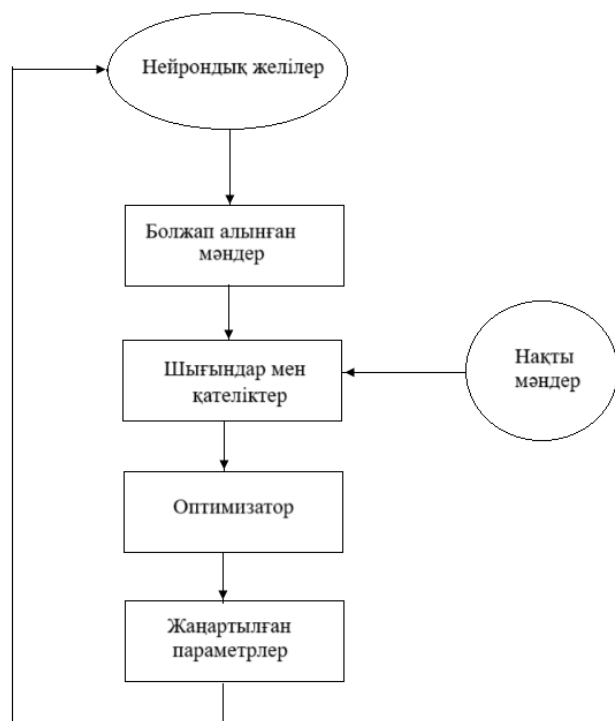
Сондықтан да күн энергиясын жинау тиімділігін арттыру үшін нейрондық желілер өте пайдалы құрал болып табылады. Олар күрделі, көп факторлы деректерді өңдей алады және жүйенің жұмысын оңтайландырып, шығынды азайтады, өндірісті арттырады [3; 4; 5].

Зерттеу нәтижесін бойынша бір күндік деректі 1-ші а,б,в суреттері бойынша көруге болады. Алынған графиктердегі деректерді нейрондық желіге енгізіп, келесі күнге арналған өндіріс болжамын жасауға болады. Онда болашақта энергияны тиімді жоспарлауға көмектеседі. Соынмен қатар, ақауларды ерте анықтап, жөндеу жұмыстарын оңтайландырады және де жүйе тиімділігін арттырады және шығынды азайтады.

Нейрондық желілерді қолдану арқылы күн электр станциясының тиімділігін барлық кезеңде арттыруға болады: мәліметтер жинаудан бастап, өндірісті болжауға, ақауларды түзетуге дейін. Бұл тек шығынды азайтумен шектелмей, жүйенің ұзақмерзімді сенімділігін де арттырады.



1-сурет – Нейрондық желінің күн электр станциясына арналған бір күндік дерек



2-сурет – Нейрондық желі процесінің жұмыс ағымының алгоритмі

2-ші суретте, нейрондық желі процесінің жұмыс ағымының алгоритмі көрсетілген. Модельге келетін бастапқы мәліметтер жасырын қабаттар арқылы өңделіп, модель бойынша болжаған нәтижелер алынады. Жұмыс бойынша нақты, белгіленген деректер алынып модель болжаған нәтижелер мен шынайы нәтижелердің айырмашылығын есептейді. Яғни, орташа абсолюттік қателікті, орташа квадраттық қателікті және де ауытқулар төзімділігін есептейді. Оптимизаторлар мәніне қарай нейрондық желінің параметрлерін (салмақтарын) жаңарту үшін алынып, жаңартылған параметрлер іске асады. Сонда оптимизатор жаңа параметрлерді есептеп, модельге қайта жібереді. Бұл процесс «итеративті» түрде қайталанып отырады, модель нақтырақ болжам жасайды. Күн энергиясын жинау тиімділігін арттыру және бақылау үшін модельдің болжауы мен шынайы мән арасындағы қатені есептеп, осы қателікке қарап нейрондық желінің параметрлерін оңтайландырады [6;7;8].

Күн бағытын бақылау жүйесін жасанды интеллект арқылы басқару - бұл нейрондық желі нақты уақыттағы деректерге бейімделіп, күн панельдерінің тиімді жұмыс істеуін қамтамасыз етеді.

Зерттеу жұмыстары бойынша қолданылған материалдар мен құралдар 1-ші кестеде көрсетілген.

1-кесте – Қолданылған материалдар мен құралдар

№	Материал / Құрал	Мақсаты
1	Күн панелі (50–100 Вт)	Энергия өндіру үшін
2	Arduino Uno / Raspberry Pi 4	Контроллер ретінде
3	LDR сенсорлары (4 дана)	Жарық қарқындылығын өлшеу
4	GPS модулі	Географиялық координаттар алу үшін
5	Сервомоторлар (2 осьті басқару)	Панельдің бағытын өзгерту үшін
6	Температура және ылғалдылық сенсоры	Ауа райын есепке алу үшін
7	Python	Жасанды интеллект алгоритмдерін құру үшін
8	MATLAB / Simulink	Модельдеу және симуляция жасау үшін

Жасанды интеллект алгоритмінің жұмыс принципі:

Машиналық оқыту кезеңі:

– Деректер жинау: LDR сенсорларынан, GPS модулінен және ауа райы сенсорларынан нақты уақыттағы мәліметтер жиналды;

– Мәліметтерді алдын ала өңдеу: деректер нормализацияланып, артық мәндер жойылды;

– Жаттығу: нейрондық желіге (мысалы, көпқабатты перцептрон — MLP немесе LSTM) өткен уақыттағы күннің қозғалыс траекториясы мен жарық деңгейі енгізілді;

– Модельді тексеру және тестілеу: дайындалған модель жаңа мәліметтерге негізделген болжауларды салыстыра отырып тексерілді.

Реал-тайм (нақты уақыттағы) басқару кезеңі:

– Сенсорлар арқылы күн бағыты мен жарық деңгейі анықталады;

– AI моделі ең тиімді панель бағытын болжайды;

– Контроллер сервомотор арқылы панельді тиісті бұрышқа бұрады;

– Бұл процесс әрбір 5–10 минут сайын қайталанып отырады.

Жүйенің тиімділігін бағалау үшін екі түрлі конфигурация салыстырылды:

– AI-бақыланатын динамикалық панель жүйесі;

– Статикалық (қозғалмайтын) панель жүйесі.

Әр жүйе бірдей ортада, бірдей күндерде 7 күн бойы сынақтан өткізілді. Күн сайынғы энергия өндіру көлемі (Вт/сағ), панельдің температурасы және жарық қарқындылығы тіркелді.

Жасанды интеллектке негізделген күн бағытын бақылау жүйесінің тиімді жұмыс істеуі үшін алдымен күннің аспандағы орнын дәл анықтап, күн панелінің бағытын сол бұрышқа сәйкестендіру қажет [9].

Күннің орны географиялық ендік, бойлық, күн уақыты және күнтізбелік күнге байланысты есептеледі. Негізгі параметрлер:

ϕ – бақылау нүктесінің географиялық ендігі;

δ – күннің ауытқу бұрышы;

H – сағаттық бұрыш;

α – күннің биіктік бұрышы;

θ – зенит бұрышы, [10]:

Күннің ауытқу бұрышы:

$$\delta = 23,45^{\circ} \cdot \sin\left(\frac{360}{365} \cdot (n + 284)\right) \quad (1)$$

мұндағы n - жылдың рет саны (1–365 күн).

Сағаттық бұрыш:

$$H = 15^{\circ} \cdot (t_{\text{жерг}} - 12) \quad (2)$$

мұндағы $t_{\text{жерг}}$ – жергілікті күн уақыты (сағатпен).

Күннің биіктік бұрышы:

$$\alpha = \arcsin(\sin \phi \cdot \sin \delta + \cos \phi \cdot \cos \delta \cdot \cos H) \quad (3)$$

Зенит бұрышы:

$$\theta = 90^{\circ} - \alpha \quad (4)$$

Панельдің оптималды бұрышы. Күн панелінің бағыты күннің орналасуына тәуелді болуы қажет. Панельдің ең тиімді көлбеу бұрышы β келесідей анықталады:

$$\beta_{\text{көлбеу}} = \phi - \delta \quad (5)$$

Алайда нақты қолдануда бұл бұрыш AI жүйесімен динамикалық түрде бейімделеді - бұл төмендегі алгоритмдер арқылы жүзеге асады.

Осы математикалық модельдер жүйесі арқылы күннің орны дәл анықталып, панельдің бағыты жасанды интеллект арқылы нақты әрі тиімді түрде реттеледі. Бұл тәсіл күн энергиясын максималды сіңіруге және генерацияланған энергия көлемін арттыруға мүмкіндік береді.

Нәтижелер және талқылау

Жасанды интеллектке негізделген күн бағытын бақылау жүйесінің тиімділігін бағалау мақсатында екі түрлі конфигурация салыстырмалы түрде зерттелді:

- AI-бақыланатын күн панелі жүйесі (динамикалық басқару);
- Статикалық (қозғалмайтын) күн панелі жүйесі (традициялық тәсіл).

Екі жүйе де бірдей климаттық жағдайда, 7 күн бойы күн сайын таңғы 8:00-ден кешкі 18:00-ге дейін сынақтан өткізілді. Әр панельден өндірілген энергия көлемі (Вт/сағ), панельдердің температурасы, жарық қарқындылығы және панельдің тиімді бұрылу бұрышы тіркеліп отырды.

2-кесте

№	Статикалық панель (Вт/сағ)	AI-бақыланатын панель (Вт/сағ)	Айырмашылық (%)
1	530	720	+35,8
2	505	698	+38,2
3	560	760	+35,7
4	480	650	+35,4
5	600	820	+36,7
6	550	750	+36,4
7	570	765	+34,2

Орташа тиімділік артуы: $\approx 36\%$

AI жүйесі күннің қозғалысына сәйкес панельді нақты бұрып отырды. Бұл панельдердің жарықты сіңіруін арттырып, энергия өндіруді айтарлықтай жақсартты. Статикалық жүйе күннің белгілі бір уақытына ғана оңтайланған, ал AI-жүйе бүкіл күн бойы бейімделіп жұмыс істеді.

Жүйенің әрекет ету уақыты және дәлдігі:

- Панельдің нақты күн бағытына бұрылу дәлдігі: ± 1.50 ;
- AI шешім қабылдау уақыты: орта есеппен 1.2 сек;
- Сенсорлар мен контроллер арасындағы кешігулер: < 0.5 сек.

Бұл көрсеткіштер жүйенің нақты уақыт режимінде сенімді жұмыс істейтінін дәлелдейді.

Ауа райы жағдайларындағы бейімделу. Бұлтты күндерде де AI жүйесі жарық қарқындылығын өлшеп, панельдерді ең жарық бағытқа бұрып отырды. Бұл жүйенің бейімделгіш қасиетін көрсетті және энергия өндірісін толық тоқтатпады. Жұмыс бойынша 5-күні, жартылай бұлтты болғанына қарамастан, AI-бақыланатын жүйе 820 Вт/сағ өндірсе, статикалық жүйе небәрі 600 Вт/сағ-қа жетті.

Сондықтан да AI жүйесінің артықшылықтарын келесідей көруімізге болады:

- Үнемі жаңартылатын шешімдер қабылдайды;
- Болашақ ауа райын болжай алады (LSTM алгоритмдерін қолданғанда);
- Жоғары дәлдік пен реакция уақыты;
- Энергия өндірісін 30–40% дейін арттыру;
- Адам қатысуынсыз автономды жұмыс істеу мүмкіндігі.

Зерттеу нәтижелері жасанды интеллектке негізделген күн бағытын бақылау жүйесінің энергия өндіру тиімділігін едәуір арттыра алатынын көрсетті. Әсіресе бұл жүйе күн сәулесінің қарқындылығы үнемі өзгеріп тұратын жағдайда да бейімделе алатын қабілетімен ерекшеленді. Сонымен қатар, алынған нәтижелер AI жүйесін күн энергетикасы саласында тек жеке тұтыну деңгейінде ғана емес, ірі өнеркәсіптік масштабта да қолдануға болатынын дәлелдейді.

Қаржыландыру туралы ақпарат: Бұл зерттеу «QazNRG Group» ЖШС-нің қаржылық қолдауымен орындалды.

Қорытынды

Бұл зерттеу жұмысы күн энергиясын жинау тиімділігін арттыру мақсатында жасанды интеллектке негізделген күн бағытын бақылау жүйесін әзірлеуге және оның жұмыс тиімділігін тәжірибелік тұрғыда талдауға бағытталды. Жобада нейрондық желілер мен нақты уақыттағы сенсорлық деректерді пайдалану арқылы күн панельдерін автоматты түрде басқару жүйесі жасалды. Панельдің бағытын күннің нақты орналасуына қарай дәл сәйкестендіру арқылы күн сәулесінің түсу бұрышын оңтайландыруға қол жеткізілді.

Салыстырмалы зерттеу нәтижелері көрсеткендей, жасанды интеллект көмегімен басқарылатын панельдер дәстүрлі статикалық панельдермен салыстырғанда орта есеппен 35–40 %-ға дейін артық электр энергиясын

өндіре алды. Бұл - күн энергиясын пайдалану тиімділігін айтарлықтай арттыруға мүмкіндік беретін жоғары нәтижелер. Жүйенің негізгі артықшылықтарына нақты уақыттағы бейімделу қабілеті, ауа райы мен жарық деңгейіндегі өзгерістерге икемді жауап беру, және адам қатысуынсыз автономды жұмыс істеу жатады.

Сонымен қатар, зерттеу барысында жасанды интеллекттің күн энергетикасы саласына енгізілуі тек тиімділікті арттырып қана қоймай, жүйенің ұзақмерзімді экономикалық және экологиялық тұрақтылығын қамтамасыз ететін негізгі технологиялық шешімдердің бірі екені дәлелденді. Бұл тәсіл болашақта интеллектуалды «ақылды» энергетикалық жүйелердің бір бөлігі ретінде ауылдық, өнеркәсіптік және урбанистік деңгейде кеңінен қолдануға жарамды.

Жасанды интеллектке негізделген күн бағытын бақылау жүйесі - жаңартылатын энергия көздерін барынша тиімді пайдалану бағытында үлкен мүмкіндіктерге ие инновациялық шешім. Бұл технология:

- Энергия тиімділігін арттырады;
- Қоршаған ортаға зиянды әсерді азайтады;
- Энергетикалық тәуелсіздікке жетуге жол ашады;
- Болашақ «ақылды» энергетика инфрақұрылымының бір бөлігі бола алады.

Пайдаланылған деректер тізімі

1 Глущенко, Т. И., Бедыч, Т. В., Хабдуллина, Г. А. Дәстүрлі емес және жаңартылатын энергетиканың теориялық негіздері. Оқу құралы. – Қостанай, – 2021. – 142 бет.

2 Minazhova, S., Ongar, B., Kurrat, M., Georgiev, A. Deploying a rooftop PV panels in the southern regions of Kazakhstan. Energy. – Vol. 320. – April. 2025. – №135205.

3 Sahu, D. K., Brahmin, A. A review on solar monitoring system. Int. Res. J. Eng. Technol. – 2021. – № 8. – P. 111–113.

4 Ravinder, K., Prabhat, T., Ongar, B., Khidolda, Y., Mohamed, O.Z., Abdullah, A. S., Shanmugan, S. Experimental study on double effect solar distiller using bioactivity nanoparticles with analysis of thermo-economic and enviro-economic. Case Studies in Thermal Engineering Received. Accepted. – 4 May 2023.

5 Haseeb, K., Almogren, A., Islam, N., Ud Din, I., Jan, Z. An energy-efficient and secure routing protocol for intrusion avoidance in IoT-based WSN. Energies. – 2019. – № 12. – P. 4174.

6 **Камилов, А. Г., Муминов, Р. А., Турсунов, М. Н.** Оценка эффективности системы солнечного элемента и коллектора в условиях жаркого климата // Гелиотехника. – 2008. – № 2. – С. 32–35.

7 **Сокут, Л. Д., Муровская, А. С.** Перспективы развития систем электроснабжения за счет подключения ветровых и солнечных электростанций с накопителями энергии в общую энергосистему // Строительство и техногенная безопасность. – 2017. – № 7 (59) – С. 113–123.

8 **Mellit, A., Kalogirou, S.** Artificial intelligence and internet of things to improve efficacy of diagnosis and remote sensing of solar photovoltaic systems: Challenges, recommendations and future directions. *Renew. Sustain. Energy Rev.* – 2021. – Vol. 143. – P. 110889.

9 **Онгар, Б., Калиев, Ж. Ж., Құлахметов, Н. И., Жақсылық, А., Карасаева, Ә. Р.** Күн фотозлектр станцияларының перспективті технологиялары мен жұмыс ерекшеліктері. М.Тынышпаев атындағы Қазақ көлік және коммуникациялар академиясының хабаршысы. ISSN 1609-1817. Вестник КазАТК. – 2022. – № 121(2). – 315–322 б.

10 **Стребков, Д. С., Майоров, В. А., Панченко, В. А.** Солнечный тепло-фотозлектрический модуль с параболоторическим концентратором // Альтернативная энергетика и экология. – 2013. – № 1/2. – С. 35–39.

References

1 **Glushenko, T. I., Bedych, T. V., Habdullina, G. A.** Dästürlı emes jäne jañartılatyn energetikanyñ teorıalyq negızderı. [Theoretical foundations of non-traditional and renewable energy] [Text]. Oqu qūraly. - Qostanai, -2021. – P.142 .

2 **Minazhova, S., Ongar, B., Kurrat, M., Georgiev, A.** Deploying a rooftop PV panels in the southern regions of Kazakhstan. *Energy.* – Vol. 320. – April. 2025. – №135205.

3 **Sahu, D. K., Brahmin, A.** A review on solar monitoring system. *Int. Res. J. Eng. Technol.* – 2021.– № 8. – P. 111–113.

4 **Ravinder, K., Prabhat, T., Ongar, B., Khidolda, Y., Mohamed, O.Z., Abdullah, A. S., Shanmugan, S.** Experimental study on double effect solar distiller using bioactivity nanoparticles with analysis of thermo-economic and enviro-economical. *Case Studies in Thermal Engineering* Received. Accepted. – 4 May 2023.

5 **Haseeb, K., Almogren, A., Islam, N., Ud Din, I., Jan, Z.** An energy-efficient and secure routing protocol for intrusion avoidance in IoT-based WSN. *Energies.* – 2019. – № 12. – P. 4174.

6 **Kamilov, A. G., Muminov, R. A., Tursunov, M. N.** Osenka effektivnosti sistemy solnechnogo elementa i kolektora v usloviakh jarkogo klimata [Evaluation of the efficiency of a solar cell and collector system in hot climate conditions] [Text]// Geliotekhnika. – 2008. – № 2. – P. 32–35.

7 **Sokut, L. D., Murovskaia, A. S.** Perspektivy razvitia sistem elektrosnabjenia za schet podklüchenia vetrovyh i solnechnyh elektrostansi s nakopitelämi energii v obşuiu energosistemu [Prospects for the development of power supply systems by connecting wind and solar power plants with energy storage devices to the general power grid] [Text] // Stroitelstvo i tehnogennaia bezopasnöst. – 2017. – № 7 (59). P. 113–123.

8 **Mellit, A., Kalogirou, S.** Artificial intelligence and internet of things to improve efficacy of diagnosis and remote sensing of solar photovoltaic systems: Challenges, recommendations and future directions. *Renew. Sustain. Energy Rev.* – 2021. – Vol. 143. – P. 110889.

9 **Ongar, B., Kaliev, J. J., Qūlahmetov, N. İ., Jaqsılyq, A., Karasaeva, Ä. R.** Kūn fotoelektr stansialarynyñ perspektivtı tehnologialary men jūmys erekselikterı. [Promising technologies and operating features of solar photovoltaic power plants] [Text]. M.Tynyşpaev atyndağy Qazaq kölik jäne komunikasialar akademiasynyñ habarşysy. ISSN 1609-1817. Vestnik KazATK. – 2022. – № 121(2). – P. 315–322.

10 **Strebkov, D. S., Maiorov, V. A., Panchenko, V. A.** Solnechnyi teplo-fotoelektricheski modül s parabolotoricheskim konsentratorom [Solar thermal photovoltaic module with parabolic concentrator] [Text]// Älternativnaia energetika i ekologia. – 2013. – № 1/2. – P. 35–39.

08.10.25 ж. баспаға түсті.

05.11.25 ж. түзетулерімен түсті.

27.02.26 ж. басып шығаруға қабылданды.

А. М. Даулетханова¹, Е. Т. Ербаев², *С. А. Минажова³,

А. П. Садвакасова⁴, Д. Д. Тананова⁵

¹Казахский национальный исследовательский технический университет имени К.И. Сатпаева, Республика Казахстан, г. Алматы;

²Западно-Казахстанский аграрно-технический университет имени Жангир хана, Республика Казахстан, г. Уральск;

^{1,3,5}ТОО «QazNRG Group» Республика Казахстан, г. Алматы;

⁴Алматинский финансово-экономический колледж,

Республика Казахстан, г. Алматы.

Поступило в редакцию 08.10.25.

Поступило с исправлениями 05.11.25.

Принято в печать 27.02.26.

РАЗРАБОТКА И АНАЛИЗ СИСТЕМЫ МОНИТОРИНГА ОРИЕНТАЦИИ СОЛНЦА НА ОСНОВЕ ИСКУССТВЕННОГО ИНТЕЛЛЕКТА

В этой статье рассматривается проблема разработки системы мониторинга направления солнечной энергии (отслеживания) на основе искусственного интеллекта и анализа ее производительности с целью повышения эффективности сбора солнечной энергии. В настоящее время эффективное использование возобновляемых источников энергии – одно из главных направлений мировой энергетической отрасли. По этой причине для обеспечения эффективной работы солнечных панелей большое значение имеет их точное отслеживание движения Солнца. В исследовании использовались глубокие нейронные сети, компьютерное зрение и методы машинного обучения, чтобы определить направление солнечного света в реальном времени и повернуть панели в этом направлении. Предлагаемая интеллектуальная система непрерывно оптимизирует работу солнечных панелей с учетом таких параметров, как интенсивность солнечного света, Изменение погоды, температура, угол расположения панелей и географические координаты. Согласно полученным результатам, управляемая система трекинга на основе искусственного интеллекта позволила увеличить объем выработки электроэнергии до 20-30% по сравнению с традиционными стационарными и механическими трекерами. Кроме того, система работает в автоматическом режиме, снижая потребление энергии и снижая затраты на

техническое обслуживание. Результаты данного исследования наглядно демонстрируют перспективность внедрения технологий искусственного интеллекта в области солнечной энергетики, роль в повышении экологической устойчивости и энергоэффективности. Системы мониторинга солнечного направления, основанные на искусственном интеллекте, также могут внести значительный вклад в развитие возобновляемых источников энергии в условиях Казахстана.

Ключевые слова: Солнечная энергия, искусственный интеллект, система отслеживания направления солнца, нейронные сети, энергоэффективность.

А. М. Dauletkhanova¹, Е. Т. Erbaev², *S. A. Minazhova³,

А. P. Sadvakasova⁴, D. D. Tananova⁵

¹Kazakh National Research Technical University named after K.I. Satbaeva, Republic of Kazakhstan, Almaty;

²West Kazakhstan Agrarian and Technical University named after Zhangir Khan, Republic of Kazakhstan, Uralsk;

^{1,3,5}«QazNRG Group» LLP, Republic of Kazakhstan, Almaty;

⁴Almaty College of Finance and Economics, Republic of Kazakhstan, Almaty.

Received 08.10.25.

Received in revised form 05.11.25.

Accepted for publication 27.02.26.

DEVELOPMENT AND ANALYSIS OF AN ARTIFICIAL INTELLIGENCE-BASED SOLAR ORIENTATION MONITORING SYSTEM

This article discusses the problem of developing a system for monitoring the direction of solar energy (tracking) based on artificial intelligence and analyzing its performance in order to increase the efficiency of solar energy collection. Currently, the efficient use of renewable energy sources is one of the main directions of the global energy industry. For this reason, to ensure the efficient operation of solar panels, their accurate tracking of the movement of the Sun is of great importance. The study used deep neural networks, computer vision, and machine learning techniques to determine the direction of sunlight in real time and rotate the panels in that direction. The proposed intelligent system continuously optimizes the operation of solar panels, taking into account such parameters as

the intensity of sunlight, weather changes, temperature, the angle of the panels and geographical coordinates. According to the results obtained, the managed tracking system based on artificial intelligence has allowed to increase the volume of electricity generation by up to 20–30 % compared with traditional stationary and mechanical trackers. In addition, the system operates automatically, reducing energy consumption and reducing maintenance costs. The results of this study clearly demonstrate the prospects for the introduction of artificial intelligence technologies in the field of solar energy, their role in improving environmental sustainability and energy efficiency. Solar direction monitoring systems based on artificial intelligence can also make a significant contribution to the development of renewable energy sources in Kazakhstan.

Keywords. Solar energy, artificial intelligence, solar direction tracking system, neural networks, energy efficiency.

МРНТИ 44.31.35

<https://doi.org/10.48081/BGQF1948>

**И. М. Дауренова¹, *Д. М. Тойбазар², М. Ж. Хазимов³,
А. К. Ниязбаев⁴, С. М. Аханов⁵**

^{1,2,3,4}Казахский Национальный Аграрный

Исследовательский Университет,

Республика Казахстан, г. Алматы;

^{1,2,3}Алматинский Университет Энергетики и

Связи имени Гумарбека Даукеева,

Республика Казахстан, г. Алматы;

⁵Кызылординский Университет имени Коркыт Ата,

Республика Казахстан, г. Кызылорда.

¹ORCID: <https://orcid.org/0009-0001-0155-6954>

²ORCID: <https://orcid.org/0009-0002-4978-4400>

³ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-5448-3122>

⁴ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-6753-5489>

⁵ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-1422-2096>

*e-mail: d.toibazar@aues.kz

«СРАВНИТЕЛЬНЫЙ АНАЛИЗ СОЛНЕЧНОЙ РАДИАЦИИ ВНУТРИ СОЛНЕЧНОГО КОЛЛЕКТОРА И НА ОТКРЫТОЙ МЕСТНОСТИ»

Солнечная энергия считается перспективным направлением для экологически устойчивой термической обработки биологических материалов. Для региона г. Алматы, характеризующегося высоким уровнем солнечной радиации (1400–1600 кВт·ч/м² в год), применение солнечных сушильных установок рассматривается как эффективное решение для сушки продуктов пчеловодства, в частности перги, требующей мягкого температурного режима для сохранения питательной ценности. Целью исследования являлась оценка солнечного потенциала региона, определение коэффициента светопропускания полимерной плёнки гелиосушилки и анализ её влияния на эффективность сушки. В работе представлены результаты исследования солнечной облучённости при сушке перговых гранул в солнечной сушилке. Измерения проводились пиранометром

GSM/O-120 на открытом участке и внутри сушильной камеры, покрытой светопрозрачной полимерной плёнкой. Оценено светопропускание плёнки и её влияние на эффективность сушки и показано снижение облученности внутри камеры и позволили рассчитать энергетические потери. В результате получено влияние солнечного излучения на режимы сушки перги, определяя длительность процесса, конечную влажность и сохранность питательных веществ. Полученные данные способствуют оптимизации конструкции гелиосушки и выбору материалов для эффективной сушки продуктов пчеловодства.

Ключевые слова: солнечная радиация, гелиосушка, облученность, пиранометр GSM/O-120, измерение излучения, пчелиная перга.

Введение

Солнечная энергия признаётся перспективным направлением для экологически устойчивой термической обработки биологических материалов. Количество солнечной радиации, поступающей на горизонтальную поверхность, зависит не только от длительности светового дня, но и от угла возвышения солнца, который варьируется в зависимости от географической широты, сезона и времени суток. Для точного расчёта солнечной радиации в современных условиях требуется разработка специализированных программных моделей, учитывающих эти параметры [1]. Это особенно важно для децентрализованных производственных систем, таких как пчеловодческие хозяйства, где доступ к линейной (централизованной) электрической и тепловой энергии ограничен [2].

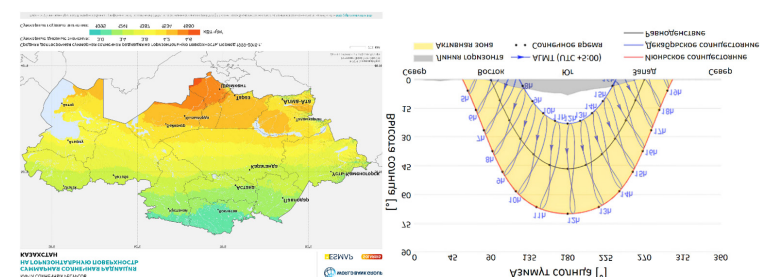
Пчелиная перга, обладающая высокой биологической активностью и чувствительная прямому солнечному свету, требует мягкого режима сушки. Одним из подходов является использование гелиосушки, в которой тепловая энергия Солнца аккумулируется через светопрозрачные пленочные покрытия [3].

Город Алматы характеризуется высоким уровнем солнечной радиации, что создает благоприятные условия для применения солнечных сушильных установок. Среднегодовое количество солнечной энергии в регионе достигает $1400\text{--}1600\text{ кВт}\cdot\text{ч}/\text{м}^2$, при наибольшей активности в летние месяцы. Однако эффективность работы гелиосушки напрямую зависит от степени проникновения солнечного излучения внутрь камеры, где происходит нагрев сушильного агента (воздуха) в солнечных коллекторах, что определяется светопропускной способностью укрывного материала [4].

Цель – определить возможность и эффективность использования солнечной энергии для сушки пчелиной перги в условиях г. Алматы с применением гелиосушильной установки, основанной на прямом и рассеянном солнечном излучении через светопрозрачные покрытия. Если климатические условия региона (г. Алматы) обеспечивают высокий уровень солнечной радиации в течение светового дня, то гелиосушильная установка сможет поддерживать стабильный тепловой режим, необходимый для сушки перги, без использования дополнительных источников тепла. Кроме того, оптические характеристики пленочных покрытий и внутренняя конфигурация камеры позволяют поддерживать достаточную облучённость внутри сушилки, обеспечивая эффективность процесса.

Материалы и методы

Для оценки солнечного потенциала и анализа климатических условий по параметрам доступной солнечной радиации использовались данные платформы Global Solar Atlas разработанной Всемирным банком и программой ESMAP. Этот ресурс предоставил обобщённые данные о средней глобальной горизонтальной радиации и потенциальной выработке солнечной энергии, в том числе и г. Алматы, что подтверждает пригодность гелиосушильной технологии для данных климатических условий [5].



а – глобальное горизонтальное радиация;

б – горизонт и солнечная дорожка

Рисунок 1 – Показатели солнечной радиации в зоне исследований

Согласно данным многолетних наблюдений (рис. 1), среднегодовая величина глобальной горизонтальной радиации в регионе составляет $1478,3\text{ кВт}\cdot\text{ч}/\text{м}^2$, что свидетельствует о высоком солнечном потенциале. Прямое нормальное излучение достигает $1495,2\text{ кВт}\cdot\text{ч}/\text{м}^2$, а диффузное излучение — $600,9\text{ кВт}\cdot\text{ч}/\text{м}^2$, что является ключевым фактором при проектировании систем, использующих как прямую, так и рассеянную

солнечную радиацию. Потенциальная годовая выработка фотоэлектрической энергии в стандартных условиях оценивается в 1418,2 кВт·ч, что подтверждает целесообразность применения солнечных установок, включая технологии сушки [6; 7]. Оптимальный угол наклона солнечных панелей для максимальной генерации энергии составляет 35° при ориентации на юг (азимут 180°). Среднегодовая температура воздуха равна 7,9 °С, а высота местности над уровнем моря – 885 м, что следует учитывать при расчёте процессов тепломассообмена в сушильной камере. Анализ диаграммы солнечного пути выявил значительную сезонную вариабельность угла возвышения Солнца. В день летнего солнцестояния максимальная высота превышает 75°, тогда как в зимний период она не превышает 25° [8]. Это обуславливает выраженные изменения интенсивности облучённости, особенно в утренние и вечерние часы. Жёлтая зона диаграммы отражает фактическую продолжительность солнечного освещения с учётом рельефа и затеняющих объектов.

Для уточнения реальных условий освещённости сушильной камеры были проведены экспериментальные измерения уровней солнечной радиации с помощью пиранометра GSM/120, предназначенного для измерения глобальной солнечной радиации на горизонтальной поверхности.

Для количественной оценки светопропускной способности материала покрытия применялась следующая формула:

$$\tau = \frac{E_{\text{внутр}}}{E_{\text{вне}}}, \quad (1)$$

где τ – коэффициент пропускания солнечного излучения (безразмерная величина);

$E_{\text{внутр}}$ – измеренное значение облучённости внутри камеры, Вт/м²;

$E_{\text{вне}}$ – измеренное значение облучённости вне камеры, Вт/м².

Также рассчитывались относительные потери солнечной энергии:

$$\Delta E = (1 - \tau) \cdot 100\% \quad (2)$$

В течение всего периода проведения измерений наблюдалось устойчивая солнечная погода, без резких изменений облачности и теней от окружающих объектов.

$$\tau = \frac{482}{557} \approx 0,87 \text{ (или 87\%)} \quad (3)$$

$$\Delta E = (1 - 0,87) \cdot 100\% = 13\% \quad (4)$$

Измеренная облучённость внутри сушильной камеры варьировалась от 540 до 810 Вт/м² при внешних значениях в диапазоне 600–900 Вт/м². Это подтверждает возможность устойчивого теплового режима, необходимого для эффективной сушки продуктов пчеловодства, в частности перговых гранул, без использования дополнительных источников энергии.

Ключевыми параметрами, определяющими эффективность работы солнечной гелиосушилки, являются температура нагрева камеры и температура воздуха на выходе из устройства. Конструктивная схема солнечного поглотителя представлена на рисунке 2. В солнечной сушилке абсорбер может размещаться горизонтально на поверхности земли с подачей воздуха через входное отверстие в торцевой части. Однако, исходя из условий, следует установить оптимальный угол наклона абсорбера в соответствии с широтой местности; угол корректируется в зависимости от сезона: зимой он уменьшается, летом – увеличивается [9].

Для Алматы (43° северной широты) угол наклона варьируется от 31° в декабре (43°–12°) до 55° в июле (43°+12°).

Эффективность воздушного коллектора (подающего солнечное тепло) была определена с учётом его поглощающих свойств и выбора прозрачной полиэтиленовой плёнки на основе устоявшегося метода расчёта. Расчёт характеристик абсорбера и температуры воздуха выполнен с использованием закона Стефана-Больцмана. Для упрощения моделирования были приняты следующие предположения: в течение анализируемого краткосрочного интервала температура поглотителя остается неизменной, а теплотери через нижнюю изоляцию коллектора минимальны [10].

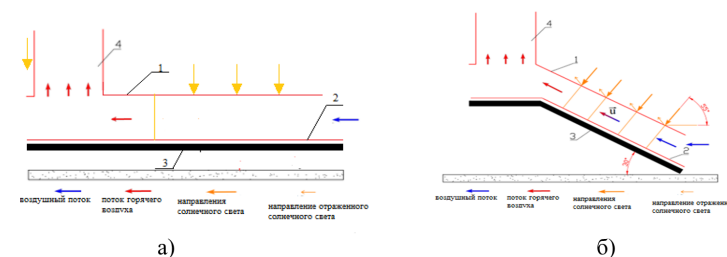


Рисунок 2 – Схематическое изображение воздушного солнечного коллектора

а) гелиосушилка на плоской поверхности;

б) гелиосушилка расположена под углом;

1 – прозрачная полиэтиленовая пленка; 2 – абсорбент;
3 – теплоизоляция; 4 – корпус улья (сушильная камера)

Падающее солнечное излучение проходит через прозрачную бесцветную полиэтиленовую плёнку с коэффициентом отражения 20 %. С учётом потерь теплового потока из-за отражения составлено уравнение баланса теплового потока.

$$q \cdot k = \varepsilon \cdot \sigma \left[\left(\frac{T_1}{100} \right)^4 - \left(\frac{T_2}{100} \right)^4 \right], \quad (5)$$

где $\sigma = 5,67 \times 10^{-8} \text{ W}/(\text{m}^2\text{K}^4)$ – постоянная Стефана-Больцмана;

$\varepsilon = 0,8$ – коэффициент излучения;

$k = 20 \%$ – коэффициент отражения пленки.

Для случая принудительной конвекции модель теплообмена в воздухооборнике описывается формулой:

$$q \cdot k = \varepsilon \cdot \sigma \left[\left(\frac{T_1}{100} \right)^4 - \left(\frac{T_2}{100} \right)^4 \right] + \alpha \frac{(\Delta T' - \Delta T)}{\ln \frac{\Delta T'}{\Delta T}} \quad (6)$$

где α – коэффициент теплопередачи, $\text{Вт}/\text{м}^2$

Экспериментальные исследования теплопередачи проводились в июле 2025 года на производственной базе Казахского Национального Аграрного Исследовательского Университета. Экспериментальная установка включала солнечный воздухонагреватель с размерами: длина – 1,6 м, ширина – 0,5 м и высота – 0,5 м. Эксперименты выполнялись при естественном дневном солнечном излучении. При достижении квазистационарного режима при заданной интенсивности солнечного потока измерялись температуры воздуха на входе (T') и выходе (T'') нагревателя, а также температура стенок абсорбера и скорость воздушного потока. Коэффициент теплопередачи абсорбера рассчитывался после стабилизации температуры стенок при постоянной интенсивности солнечного излучения. В каждой серии экспериментов тепловой поток определялся с использованием соответствующего уравнения.

$$Q = G \cdot C_p (T'' - T'). \quad (7)$$

где C_p – удельная теплоемкость воздуха.

Массовый расход воздуха определяли следующим образом:

$$G = U \cdot \rho \cdot S, \quad (8)$$

где $\rho = 1293 \text{ кг}/\text{м}^3$ – плотность воздуха;

S – площадь поперечного сечения канала, м^2 .

Продолжая оценку солнечного потенциала г. Алматы, важно проанализировать почасовую динамику прямого нормального солнечного излучения, которое играет ключевую роль в функционировании гелиосушительных установок, преимущественно использующих направленное солнечное тепло. Согласно данным, годовое значение достигает $1511,5 \text{ кВт} \cdot \text{ч}/\text{м}^2$, что указывает на высокий уровень прямой солнечной радиации в регионе. Среднемесячные показатели варьируются от $80 \text{ кВт} \cdot \text{ч}/\text{м}^2$ в декабре до более $200 \text{ кВт} \cdot \text{ч}/\text{м}^2$ в июле и августе, демонстрируя выраженную сезонную зависимость.

Профили средней суточной активности показывают, что пик радиации приходится на полуденные часы (12:00-13:00) по местному солнечному времени. При этом в летний период наблюдается значительное расширение «окна активности» – с интенсивным излучением в интервале с 9:00 до 16:00. Это позволяет обеспечить стабильный тепловой режим внутри гелиосушительной камеры без использования дополнительных источников энергии.

На основании предварительной оценки солнечного потенциала по данным платформы Global Solar Atlas было установлено, что климатические условия г. Алматы благоприятны для применения гелиосушительных установок. Однако данные атласа характеризуют лишь усредненный радиационный фон региона и не учитывают локальные особенности, такие как потери на прозрачных покрытиях, затенения, угол падения солнечных лучей и внутренние тепловые условия.

Методика измерений может быть рекомендована как инструмент инженерной валидации климатических данных, получаемых из глобальных моделей, таких как Global Solar Atlas, а также при выборе конструкционных материалов для солнечных тепловых установок [11].

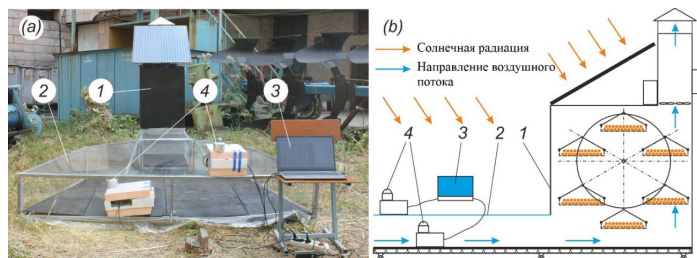


Рисунок 3 – Комплект приборов и устройства для исследования потери солнечной энергии
а) общий вид экспериментального устройства;
б) схема работы устройства;

1 – корпус, 2 – дверцы, 3 – компьютер, 4 – пиранометр

На изображении представлен эксперимент по измерению солнечной инсоляции до и после прохождения солнечного излучения через плёнку коллектора. Слева (рис.3а) показано фотография экспериментальной установки, справа (рис. 3б) её схематическое изображение.

Инсоляция после фильтрации характеризует суммарную солнечную радиацию под плёнкой коллектора – ту часть солнечного излучения, которая проходит через плёнку и поступает внутрь системы. Сравнение этих параметров позволяет оценить эффективность светопропускания плёнки и её влияние на тепловые потери коллектора. Таким образом, эксперимент направлен на количественную оценку прозрачности плёнки и её влияния на общий энергетический баланс солнечного коллектора.

Для обеспечения высокой точности измерений солнечной радиации в экспериментальных исследованиях была проведена калибровка пиранометра GSM/O-120 и регистрирующего устройства MSD-200. Процедура калибровки выполнялась в соответствии с международными стандартами (например, ISO 9847:1992) и рекомендациями производителя оборудования.

Пиранометр GSM/O-120 устанавливался горизонтально на открытой площадке, свободной от затеняющих объектов (зданий, деревьев и т.д.). Измерения выполнялись в диапазоне углов падения солнечных лучей от 30° до 60°, что соответствует типичным условиям эксплуатации гелиосушильной установки. Температура окружающей среды и влажность фиксировались для учёта возможного влияния климатических условий на чувствительность прибора. Регистрирующее устройство MSD-200 было синхронизировано с пиранометром для обеспечения точной временной привязки данных. Калибровочные измерения проводились с интервалом 1 минута в течение не менее 15 минут для получения

статистически значимого набора данных. Показания пиранометра сравнивались с эталонными значениями, и коэффициент калибровки (чувствительность, мВ/(Вт/м²)) корректировался при необходимости.

После калибровки была оценена погрешность измерений. Для пиранометра GSM/O-120 суммарная погрешность, включающая инструментальную, температурную и угловую, составляющие, составила менее $\pm 2\%$ в диапазоне облучённости 500–1000 Вт/м². Регистрирующее устройство MSD-200 обеспечивало точность записи данных с погрешностью не более $\pm 0,5\%$. Эти значения подтверждают надёжность полученных результатов.

Внутренний пиранометр размещался внутри коллектора под светопрозрачной плёнкой на аналогичной высоте, обеспечивая прямую видимость через плёнку без затенения от стенок или других элементов конструкции. Оба прибора крепились с помощью штативов или специальных креплений для исключения колебаний под воздействием ветра. Угол наклона пиранометров был установлен в 0° (горизонтальное положение), что соответствует стандарту ГОСТ Р 54166-2011 для измерения суммарной радиации. Измерения проводились с 05:00 до 20:00 по местному времени (UTC+5), что охватывает полный световой день 19 июня 2025 года. Данные регистрировались каждые 30 минут с помощью MSD-200 для получения почасовой динамики инсоляции.

Внешний пиранометр фиксировал полную облучённость, а внутренний – облучённость после прохождения через плёнку. Учитывалось изменение угла падения солнечных лучей в течение дня (от утреннего до вечернего положения), что позволило оценить стабильность коэффициента пропускания плёнки.

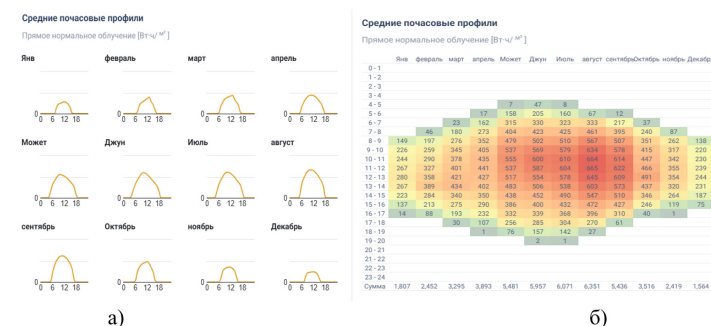


Рисунок 4 – Профиль прямой нормальной солнечной радиации в г. Алматы по данным Global Solar Atlas
а) средние почасовые профили; б) месячная динамика

Представленные графики на рисунке 4 демонстрируют сезонную и дневную изменчивость температуры, зависящую от интенсивности солнечного излучения. Высота пиков указывает на эффективность нагрева в разные месяцы, с максимальной активностью в летние месяцы (июль, август) и минимальной – в зимние (декабрь).

Для проведения экспериментального исследования солнечной облучённости в процессе сушки перговых гранул в гелиосушилке была разработана следующая методика:

- определение коэффициента пропускания солнечного излучения через светопрозрачную полимерную плёнку гелиосушилки
- анализ суточной динамики облучённости внутри и вне сушильной камеры.

Измерения проводились 19 июня 2025 года с 05:00 до 20:00 по местному времени (UTC+5), охватывая полный световой день.

В результате экспериментального исследования для подтверждения расчетных данных была получена графическая зависимость температуры воздуха вдоль длины солнечного коллектора (абсорбера) для различных скоростей воздушного потока (рис.5).

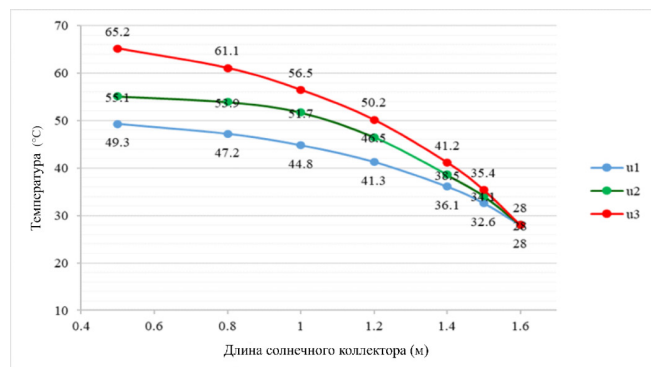


Рисунок 5 – Изменение температуры воздуха по всей длине солнечного коллектора (абсорбера) при различных скоростях потока

Территория Алматы попадает в зону стабильного потенциала, с величиной порядка 1400–1600 кВт·час/кВт, что позволяет планировать применение солнечной сушки в течение продолжительного периода года.

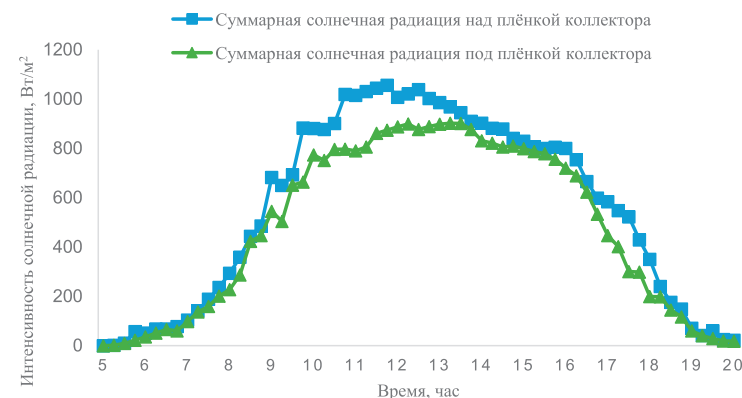


Рисунок 6 – Интенсивность солнечной радиации

График, представленный на изображении, демонстрирует изменение плотность потока излучения (Вт/м^2) во времени – от раннего утра до вечера. По оси X отложено время суток (часы; минуты), а по оси Y – облучённость в ваттах на квадратный метр (Вт/м^2).

Результаты и обсуждение

Данные проведённых измерений облучённости в течение светового дня показали чётко выраженную суточную динамику солнечной радиации, характерную для ясных погодных условий. Максимальные значения плотности потока излучения были зафиксированы в период с 12:00 до 13:00, достигнув около 1000 Вт/м^2 на внешней поверхности и 870 Вт/м^2 внутри сушильной установки, что свидетельствует о высокой интенсивности инсоляции в полуденное время. В утренние (05:00–08:00) и вечерние (17:00 – 20:00) часы наблюдалось постепенное снижение облучённости до минимальных значений, колеблющихся в пределах $0\text{--}200 \text{ Вт/м}^2$, что согласуется с естественному суточному ходу солнечной активности.

Сравнительный анализ внешней и внутренней облучённости показал, что потери солнечной радиации составляют в среднем 13 %, что соответствует коэффициенту светопропускания плёнки 0,87. Данный показатель соответствует нормативным требованиям для гелиосушильных установок и подтверждает эффективность применённого покрытия, используемого в конструкции сушильной камеры. Важным наблюдением стало то, что коэффициент светопропускания оставался стабильным в течение всего дня, несмотря на изменение угла падения солнечных лучей, что свидетельствует

о равномерности оптических характеристик материала и его надёжности при эксплуатации.

Сравнение экспериментальных данных с информацией, представленной в Global Solar Atlas, показало высокую степень соответствия полученных значений с расчётной суточной инсоляцией для исследуемого региона. Это подтверждает достоверность проведённых измерений и позволяет использовать результаты в качестве обоснования для проектирования и эксплуатации гелиосушительных установок в аналогичных климатических условиях.

Таким образом, проведённые исследования демонстрируют, что применённая конструкция с выбранным материалом покрытия обеспечивает достаточный уровень инсоляции для технологических процессов гелиосушителей, в частности, для сушки перги в условиях пасечного хозяйства. Высокая прозрачность покрытия при одновременном сохранении его термозащитных свойств делает его оптимальным решением для использования в гелиосушительных технологиях.

Выводы

Проведённое исследование подтвердило целесообразность использования солнечной энергии для сушки биологически активных продуктов пчеловодства, в частности перги, в климатических условиях г. Алматы. На основе экспериментальных измерений солнечной облучённости установлено, что гелиосушительная установка обеспечивает устойчивый тепловой режим в течение большей части светового дня, особенно в летний период, когда интенсивность солнечного излучения достигает пиковых значений (до 900 Вт/м² снаружи и 810 Вт/м² внутри камеры).

Сравнение экспериментальных данных с информацией, полученной из глобальной модели *Global Solar Atlas*, показало высокую степень соответствия. При этом измерения на месте позволили учесть локальные особенности, такие как угол падения солнечных лучей, затенение и оптические свойства покрытий. Это подчёркивает необходимость инженерной валидации климатических моделей при проектировании гелиоустановок.

Полученный коэффициент светопропускания плёночного покрытия (в среднем 0,87) соответствует требованиям для гелиосушительных систем и подтверждает его пригодность для поддержания мягкого режима сушки, необходимого для сохранения качественных характеристик перги. Также установлено, что в период с 9:00 до 16:00 можно обеспечить эффективную сушку без использования дополнительных источников энергии.

Таким образом, в условиях ограниченной доступности централизованных энергетических ресурсов в малых пчеловодческих хозяйствах применение гелиосушительных установок является технологически эффективным, экологически устойчивым и энергетически оправданным решением.

Список использованных источников

- 1 **Федоров, В. М.**, Солнечная радиация и климат земли. // М. Изд-во Физматлит 2018 – 232с. ISBN 978-5-9221-1785-2.
- 2 **Королёва, Д. Владимир В., Шайдаков** Солнечная энергетика. // Учебное пособие 2023. ISBN 9785972914883.
- 3 **Ахметова, Л. Т., Гармонов, С. Ю., Сибгатуллин, Ж. Ж. Ахметова, Р. Т. Сопин В. Ф., Зеваков, И. В.** Технологии извлечения перги из природного сырья с целью получения биологически активных продуктов // Вестник Казанского технологического университета. – Т. 20. Стр. 184–190. 2011.
- 4 **Дауренова. И. М., Тойбазар, Д. М. Сапарғали, А. Ж. Хазимов, М. Ж.** Эффективная технология и средств переработки пчелиных сотов на пергу и восковое сырьё в Казахстане. // Исследования, результаты. №2 (102) Алматы-2024, <https://doi.org/10.37884/2-2024/51>
- 5 Global Solar Atlas. Available online: <https://globalsolaratlas.info/detail?s=42.89568,71.37812&m=site&c=42.895586,71.378174,11>, (accessed on 18 August 2025)
- 6 **Абаев, А. Есенгельдин, Б. Ситенко Д., Акбаев, Е.** Возможности использования солнечной энергии для развития сельских районов Республики Казахстан. // Международный журнал энергетической экономики и политики, Т. 8, № 2, Алматы 2018. <https://www.availableathttp://www.econjournals.co>
- 7 **Karatayev, M. and Clarke, M. L.** A review of current energy systems and green energy potential in Kazakhstan. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2016. 55, pp. 491–504.
- 8 **Zang, H. X., Guo, M., Wei, Z. N., Sun, G. Q.** «Determination of the Optimal Tilt Angle of Solar Collectors for Different Climates of China». Sustainability, vol. 8, no.7, 2016, article 654. <https://doi.org/10.3390/su8070654>.
- 9 **Rizalman, M. K. et al.** A review of solar drying technology for agricultural produce. Indonesian Journal of Electrical Engineering & Computer Science, Vol. 30, No. 3, June 2023, pp. 14071419.
- 10 **Федянина, В. Я., Хомутова, С.О., Иванова, В. М.** Основы использования нетрадиционных и возобновляемых источников энергии / под ред.- Барнаул, ООО «МЦ ЭОР», 2018. ISBN 9785604035429

11 Atlassolar.kz. The Atlas of Solar Resources of Kazakhstan. Available at: <http://atlassolar.kz>, 2017.

References

1 **Fedorov, V. M.** Solnechnaya radiatsiya i klimat Zemli // Moskva : Izd-vo Fizmatlit, 2018. – 232 s. ISBN 978-5-9221-1785-2.

2 **Korolyova, D. V., Vladimirov, V. V., Shaidakov.** Solnechnaya energetika // Uchebnoe posobie, 2023. ISBN 978-5-9729-1488-3.

3 **Akhmetova, L. T., Garmonov, S. Yu., Sibgatullin, Zh. Zh., Akhmetova, R. T., Sopin, V. F., Zevakov, I. V.** Tekhnologii izvlecheniya pergi iz prirodnogo syr'ya s tsel'yu polucheniya biologicheskii aktivnykh produktov // Vestnik Kazanskogo tekhnologicheskogo universiteta. – T. 20. – S. 184–190. – 2011.

4 **Daurenova, I. M., Toibazar, D. M., Sapargali, A. Zh., Khazimov, M. Zh.** Effektivnaya tekhnologiya i sredstva pererabotki pchelinykh sotov na pergu i voskovoe syr'e v Kazakhstane // Issledovaniya, rezul'taty. – № 2 (102). – Almaty, 2024. – <https://doi.org/10.37884/2-2024/51>

5 Global Solar Atlas. Available online: <https://globalsolaratlas.info/detail?s=42.89568,71.37812&m=site&c=42.895586,71.378174,11>, (accessed on 18 August 2025)

6 **Abaev, A., Yesengeldin, B., Sitenko, D., Akbaev, E.** Vozmozhnosti ispol'zovaniya solnechnoi energii dlya razvitiya sel'skikh raionov Respubliki Kazakhstan // Mezhdunarodnyi zhurnal energeticheskoi ekonomiki i politiki. – T. 8, № 2. – Almaty, 2018. – Available at: <https://www.available.at> <http://www.econjournals.co>

7 **Karatayev, M. and Clarke, M. L.** A review of current energy systems and green energy potential in Kazakhstan. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2016. 55, pp. 491-504.

8 **Zang H.X., Guo M., Wei Z.N., Sun G.Q.** «Determination of the Optimal Tilt Angle of Solar Collectors for Different Climates of China». Sustainability, vol. 8, no. 7, 2016, article 654. <https://doi.org/10.3390/su8070654>

9 **Rizalman, M. K.** et al. A review of solar drying technology for agricultural produce. Indonesian Journal of Electrical Engineering & Computer Science, Vol. 30, No. 3, June 2023, pp. 14071419.

10 **Fedyanina, V. Ya. Khomutova, S. O. Ivanova, V. M.** Osnovy ispol'zovaniya netraditsionnykh i vozobnovlyemykh istochnikov energii [Text] / pod red. – Barnaul: OOO “MTs EOR”, 2018. ISBN 978-5-6040354-2-9.

11 Atlassolar.kz. The Atlas of Solar Resources of Kazakhstan. Available at : <http://atlassolar.kz>, 2017.

Поступило в редакцию 23.09.25

Поступило с исправлениями 14.11.25.

Принято в печать 27.02.26.

*И. М. Дауренова¹, *Д. М. Тойбазар², М. Ж. Хазимов³,*

А. К. Ниязбаев⁴, С. М. Аханов⁵

^{1,2,3,4}Қазақ Ұлттық Аграрлық Зерттеу Университеті,

Қазақстан Республикасы, Алматы қ.;

^{1,2,3}Ғұмарбек Даукеев атындағы Алматы Энергетика және Байланыс

Университеті Қазақстан Республикасы, Алматы қ.;

⁵Қорқыт ата атындағы Қызылорда Университеті,

Қазақстан Республикасы, Қызылорда.

23.09.25 ж. баспаға түсті.

14.11.25 ж. түзетулерімен түсті.

27.02.26 ж. басып шығаруға қабылданды.

КҮН КОЛЛЕКТОРЫНЫҢ ІШІНДЕГІ ЖӘНЕ АШЫҚ ЖЕРДЕГІ КҮН РАДИАЦИЯСЫН САЛЫСТЫРМАЛЫ ТАЛДАУ

Күн энергиясы биологиялық материалдарды экологиялық тұрақты термиялық өңдеу үшін перспективалы бағыт болып саналады. Күн радиациясының жоғары деңгейімен (жылына 1400-1600 кВт-сағ/м²) сипатталатын Алматы қ. өңірі үшін күн кептіру қондырғыларын қолдану тағамдық құндылығын сақтау үшін жұмсақ температуралық режимді талап ететін ара шаруашылығы өнімдерін, атап айтқанда ара нанын кептіру үшін тиімді шешім ретінде қарастырылады. Зерттеудің мақсаты аймақтың күн әлеуетін бағалау, гелиосушылканың полимерлі пленкасының жарық беру коэффициентін анықтау және оның кептіру тиімділігіне әсерін талдау болды. Жұмыста ара нанының түйіршіктерін күн кептіргіште кептіру кезінде күн сәулесінің әсерін зерттеу нәтижелері келтірілген. Өлшеу GSM/O-120 пиранометрімен ашық жерде және мөлдір полимерлі пленкамен жабылған кептіру камерасының ішінде жүргізілді. Пленканың жарық өткізгіштігі және оның кептіру тиімділігіне әсері бағаланды және камера ішіндегі сәулеленудің

төмендеуі көрсетілді және энергия шығынын есептеуге мүмкіндік берді. Нәтижесінде процестің ұзақтығын, соңғы ылғалдылықты және қоректік заттардың сақталуын анықтай отырып, ара нанының кептіру режимдеріне күн радиациясының әсері пайда болады. Нәтижелер гелио кептіргіштің дизайнын оңтайландыруға және ара өнімдерін тиімді кептіру үшін материалдарды таңдауға ықпал етеді.

Кілтті сөздер: күн радиациясы, гелиосушка, сәулелену, GSM/O-120 пиранометрі, сәулеленуді өлшеу, ара арасы.

*I. M. Daurenova¹, *D. M. Toibazar², M. Zh. Khazimov³,*

A. K. Niyazbayev⁴, S. M. Akhanov⁵

^{1,2,3,4}Kazakh National Agrarian Research University,

Republic of Kazakhstan, Almaty;

^{1,2,3}Almaty University of Power Engineering and Telecommunications after named Gumarbek Daukeyev, Republic of Kazakhstan, Almaty;

⁵Korkyt Ata Kyzylorda State University,

Republic of Kazakhstan, Kyzylorda.

Received 23.09.25.

Received in revised form 14.11.25.

Accepted for publication 27.02.26.

COMPARATIVE ANALYSIS OF SOLAR RADIATION INSIDE A SOLAR COLLECTOR AND IN AN OPEN AREA

Solar energy is recognized as a promising direction for the environmentally sustainable heat treatment of biological materials. For the Almaty region, characterized by a high level of solar radiation (1400-1600 kWh/m² per year), the use of solar drying plants is considered as an effective solution for drying bee products, in particular bee bread, which requires a mild temperature regime to preserve nutritional value. The purpose of the study was to evaluate the solar potential of the region, determine the light transmission coefficient of the polymer film of the solar dryer and analyze its effect on drying efficiency. The paper presents the results of a study of solar irradiation during drying of pearl pellets in a solar dryer. The measurements were carried out with a GSM/O-120 pyranometer in an open area and inside a drying chamber covered with a translucent polymer film. The light transmission of the film and its effect on the drying efficiency were evaluated, and a decrease in irradiation

inside the chamber was shown and energy losses were calculated. As a result, the effect of solar radiation on the drying modes of bee bread was obtained, determining the duration of the process, the final humidity and the preservation of nutrients. The data obtained contribute to optimizing the design of the solar dryer and the choice of materials for effective drying of bee products.

Keywords: solar radiation, solar cell, irradiance, GSM/O-120 pyranometer, radiation measurement, bee parchment.

М. А. Драганова¹, *Е. Г. Нешина²^{1,2}Некоммерческое акционерное общество

«Карагандинский технический

университет имени Абылкаса Сагинова»,

Республика Казахстан, г. Караганда.

¹ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-3421-128X>²ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-8973-2958>*e-mail: 1_neg@mail.ru**ГАЗОГЕНЕРАТОРНЫЙ КОТЕЛ НА ОСНОВЕ ПИРОЛИЗНОГО СПОСОБА ПЕРЕРАБОТКИ БЫТОВЫХ ОТХОДОВ**

В данной статье представлено решение актуальной задачи по газификации влажного сырья в реторте газогенератора за счет повышения тепловосприятности поверхностью реторты тепла дымовых газов без увеличения тепловой мощности топки. Анализ аналитических моделей тепловых процессов при пиролизе сырого сырья в реторте с учетом испарительной способности этого сырья и минимального значения энтальпии парообразования ее влаги в условиях внутреннего объема реторты позволил сформулировать, что повышение испарительной способности влажного сырья в реторте увеличением тепловосприятности поверхностью реторты тепла дымовых газов за счет оребрения ее наружной поверхности минимально и составляет сотую часть теплоты дымовых газов. Статья посвящена вопросам разработки котла газогенераторного на основе пиролизного способа. Переработка шин, пластмассовых изделий, отходов жизнедеятельности животноводства и остального мусора - одна из наиболее востребованных задач современного мира. Разработанный котел газогенераторный на основе пиролизного способа изготовлен для нужд небольших хозяйств и для частных домов, где есть крайне острая нужда переработки углеводородных отходов, а также отходов жизнедеятельности животноводства. Изложены основные преимущества котла газогенераторного на основе пиролизной технологии для переработки углеводородных отходов, такие как, минимальный расход электроэнергии,

использование тепловой энергии стенок котла для нагрева воды для теплоснабжения потребителей.

Ключевые слова: котел газогенераторный, газогенератор, реторта, теплообменная поверхность, теплопередача, тепловосприятность, тепловые процессы, энтальпия.

Введение

Газогенераторы являются перспективными для утилизации отходов промышленности, сельского хозяйства и быта. Газификация сухих бытовых отходов современных городов газогенераторами решает актуальную задачу экологически чистой их утилизации.

В реальных условиях сырье, загружаемое в реторту газогенератора, является влажным. Повышение испарительной способности влажного сырья в реторте возможно повышением тепловой мощности топки, в которой установлена реторта и повышением тепловосприятности поверхности реторты без увеличения тепловой мощности топки.

Дымовые газы топки обтекают боковые поверхности реторты, передают тепловую энергию сырью теплопередачей через стенки, выходят через боров в дымоотвод. В соответствии с законом теплопередачи Ньютона-Рахмана и Фурье, увеличить теплопередачу через стенку возможно за счет повышения температурного напора и площади тепловосприятности при неизменном коэффициенте теплопередачи.

Целью статьи является оценка теплоты от повышения площади тепловосприятности оребрением тепловоспринимающей поверхности стенок реторты, что позволит повысить испарительную способность и обеспечить газификацию влажного сырья в реторте[1].

Материалы и методы

Для оценки теплоты от повышения площади тепловосприятности оребрением тепловоспринимающей поверхности стенок реторты можно использовать нижеследующие методы расчета, чтобы повысить испарительную способность сырья и обеспечить повышенную газификацию влажного сырья в реторте.

Тепловая мощность топки на 1 кг сжигаемого топлива Вт, кг/с [2]:

$$Q_T = B * Q_H^P, \text{ В} \quad (1)$$

где Q_H^P - низшая теплота сгорания топлива, Дж.

Тепловосприятность стенок реторты:

$$Q_R = Q_D + Q_{\text{оребр}} + Q_{\text{пов.рет}} \quad (2)$$

где Q_D – теплопередача сырью из топки через донные наружные тепловоспринимающие поверхности реторты;

$Q_{\text{пов.рет}}$, $Q_{\text{оребр}}$ – теплопередача от дымовых газов сырью наружной неоребренной поверхностью и ребрениями поверхности реторты (рисунок 1).

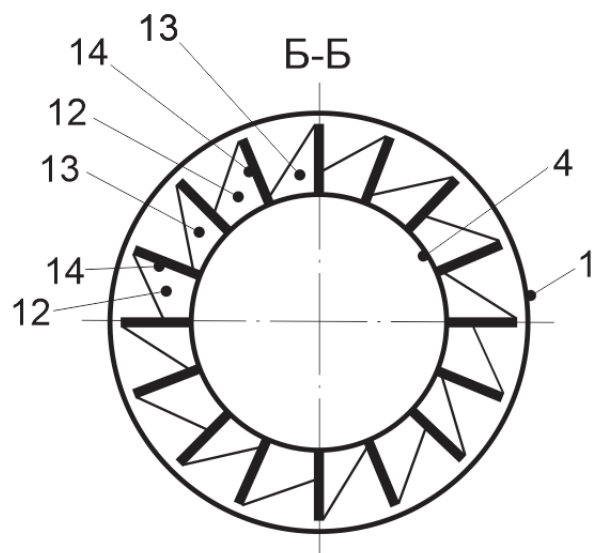


Рисунок 1– Ребрение реторты (вид сверху)

Для определения влияния ребрения на испарительную способность влаги в сырье [3] необходимо составить тепловой баланс влажного сырья в период его сушки до возникновения пиролиза сухого сырья с соответствующим тепловыделением дымовых газов Q_D поверхностей ребрения $Q_{\text{оребр}}$ и реторты $Q_{\text{пов.рет}}$ для обеспечения тепла на парообразование $Q_{\text{П}}$:

$$Q_{\text{П}} = Q_D + Q_{\text{оребр}} + Q_{\text{пов.рет}}, \quad (3)$$

$$q_1 + q_2 + q_3 = 1 \quad (4)$$

$$\text{где } q_1 = \frac{Q_D}{Q_{\text{П}}}; q_2 = \frac{Q_{\text{оребр}}}{Q_{\text{П}}}; q_3 = \frac{Q_{\text{пов.рет}}}{Q_{\text{П}}}$$

Пусть q_1 и $q_2 = \text{const}$, тогда:

$$q_2 = 1 - (q_1 - q_3) \quad (5)$$

$$q_2 \leq 1 \text{ при } q_1, q_3 \geq 0$$

$$Q_{\text{оребр}} \leq Q_{\text{П}} \quad (6)$$

В соответствии с условием (6) ребрение является дополнительным средством для прибавки тепла от стенок реторты для испарения влаги сырья (5).

Теплота от ребрения $Q_{\text{оребр}}$ в балансе с теплотой на испарение влаги сырья:

$$Q_{\text{оребр}} = D_{\text{ч}} * i_{\text{П}} * \left(1 - \frac{i_{\text{В}}}{i_{\text{П}}}\right), \quad \frac{\text{кДж}}{\text{ч}}, \quad (7)$$

где $D_{\text{ч}}$ – часовое количество полученного пара из влажного сырья, кг/ч;

$i_{\text{П}}$, $i_{\text{В}}$ – энтальпии пара и исходного влажного сырья, кДж/кг [4].

Теплота от ребрения зависит от расхода B , кг/ч, теплосодержания $Q_{\text{П}}$, кДж, омывающих дымовых газов, от площади теплопередающих поверхностей ребрения S , м², температурного напора Δt , параметров и условий теплопередачи дымовых газов через ребрения влажному сырью: Re , Pr , Nu , $Ct_{\text{ч}}$:

$$\left\{ \begin{array}{l} Q_{\text{оребр}} = B * Q_{\text{Т}} \\ Q_{\text{оребр}} = f(S, \Delta t, Re, Pr, Nu, Ct_{\text{ч}}) \end{array} \right\} \quad (8)$$

Отношение часового паропроизводства из влажного сырья к часовому расходу теплосодержащих дымовых газов B , кг/ч представляется испарительной способностью влаги сырья I , кг пара/кг дымовых газов [4]:

$$I = \frac{D_{\text{ч}}}{B} \quad (9)$$

тогда, с учетом (7), (8), (9), получим:

$$И = \frac{Q_{\Gamma}}{i_{\Pi} * (1 - \frac{i_B}{i_{\Pi}})}, \frac{\text{кДж газа}}{\text{кДж пара}} \quad (10)$$

Повышение испарительной способности влажного сырья обеспечивает рост теплосодержания дымовых газов и снижение энтальпии получаемого пара из влажного сырья для рассмотренной системы: теплоисточник – дымовые газы для конечного теплопотребителя – влага сырья [5].

Для системы: теплоисточник – теплота от оребрения на наружной поверхности реторты для конечного теплопотребителя – влага сырья имеют место уравнения баланса тепла (8).

Представим испарительную способность влаги сырья (9) через испарительную способность теплоты оребрения «А», из выражения (10) имеем:

$$И = \frac{A * Q_{\Gamma}}{Q_{\text{оребр}}}, \quad (11)$$

где

$$A = \frac{Q_{\text{оребр}}}{i_{\Pi} * (1 - \frac{i_B}{i_{\Pi}})}, \frac{\text{кДж оребрения}}{\text{кДж пара}} \quad (12)$$

Приведенная к теплоте оребрения в выражении (11) теплота дымовых газов имеет предельные значения:

$$1 \geq \frac{Q_{\Gamma}}{Q_{\text{оребр}}} > 0$$

Если $\frac{Q_{\Gamma}}{Q_{\text{оребр}}} = 1$, то $И = А$, максимальная испарительная способность теплоты оребрения А соответствует испарительной способности влаги сырья.

Определим минимальное значение энтальпии парообразования влаги сырья в условиях внутреннего объема реторты с влажным сырьем. Известно [6], что максимальное количество водяного пара в сухом воздухе реторты определяет состояние насыщенного воздуха без состояния тумана. Это важное условие при газификации сырья. Плотность и парциальное давление пара для данной температуры максимально возможны. При температуре воздуха до 100 °С плотность и парциальное давление пара в насыщенном воздухе равны плотности и давлению насыщенного пара при температуре воздуха до 100 °С [7]. Поэтому, в выражении (12) знаменатель:

$$i_{\Pi} * \left(1 - \frac{i_B}{i_{\Pi}}\right) \leq 100.$$

Тогда испарительная способность теплоты оребрения А, составляет сотую часть теплоты за счет оребрения:

$$A = 0,01 * Q_{\text{оребр}}. \quad (13)$$

И тогда из выражения (6):

$$Q_{\Pi} \geq 100 * A. \quad (14)$$

Результаты и обсуждения

Результатом нового технического решения является создание устройства, обеспечивающего одновременный процесс сушки сырья и образования газов. Повышение температуры газов в реторте происходит при увеличении площади поверхности реторты и ее теплоотдачи. Убыстрение движения дымовых газов у стенок реторты, одинаковый нагрев наружных стенок реторты, создание условий для устранения взрывоопасной ситуации в зоне борова, которые увеличивают КПД котла при газификации влажного сырья.

Положительный результат достигается тем, что котел газогенераторный, содержащий топку с камерой сгорания и горелками, реторту с крышкой, камерой газификации, боров с дымовой трубой в верхней зоне топки, тракты парогаса и газа пиролиза, конденсатор-сепаратор [8]. Реторта выполнена в топке с образованием дымохода между наружной поверхностью реторты и стенками топки. Тракт парогаса пиролиза установлен из крышки в конденсатор-сепаратор. Тракт газа пиролиза выполнен из конденсатора- сепаратора в горелки. На наружной поверхности реторты выполнены каналы дымоходные в направлении от камеры сгорания к борovu с параллельным чередованием и постоянным шагом, с расширяющимся и сужающимся профилем, формой равнобокой криволинейной трапеции. Равнобокие стороны последней ортогональны касательным к поверхностям реторты и котла, оси симметрии каналов равноотклонены от вертикальной оси симметрии реторты. Кроме того, каналы дымоходные выполнены пластинчатыми ребрами, цилиндрическими стенками реторты и котла (рисунок 2) [9].

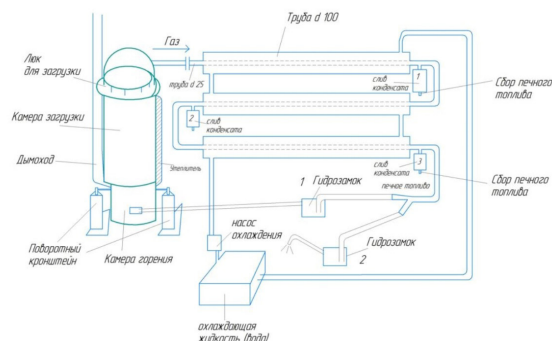


Рисунок 2 – Схема газогенераторного котла на основе пиролизной установки

Недостаток теплообменной поверхности заключается в невозможности использования жидкого сырья во внутренней трубе в качестве топлива в виду специфического предназначения трубы для сжигания сухого пылевидного или газообразного топлива.

Котел газогенераторный может использоваться для:

→ увеличения тепловой мощности стенок реторты и места возникновения газов для одновременного процесса сушки и газификации отходов жизнедеятельности животноводства процессом пиролиза, а именно:

→ активизирует теплоотбор у дымовых газов, повышает тепловоспринимающую способность поверхности реторты за счет выполнения на наружной поверхности реторты каналов дымоходных в направлении от камеры сгорания к борову с параллельной их установкой, чередованием профилей с равным шагом и выполнением каналов пластинчатыми ребрами, которые увеличивают площадь тепловосприятия реторты (каналы дымоходные выполнены стенками реторты, котла и пластинчатыми ребрами);

→ активизирует движение дымовых газов при протекании в каналах дымоходных за счет их расширяющихся и сужающихся профилей, формы равнобокой криволинейной трапеции и поступление тепла с дымовыми газами к тепловоспринимающей поверхности реторты;

→ обеспечивает равномерность нагрева поверхности реторты по наружному периметру благодаря наклону продольной оси симметрии каналов дымоходных к вертикальной оси симметрии реторты, оси симметрии каналов равноотклонены от вертикальной оси симметрии реторты,

равнобокие стороны трапеции ортогональны касательным к поверхностям реторты и котла;

→ убираются взрывоопасные смеси с воздухом углеводородов в зоне борова благодаря перемешиванию исходящих потоков за счет различия их скоростей в выходных сечениях расширяющихся и сужающихся профилей каналов дымоходных;

→ повышается безопасность взрывов и сброс сильного давления дымовых газов в зоне борова, так как формируются обратные потоки продуктов горения в топку в направлении от борова к камере сгорания через каналы дымоходные с сужающимися профилями, которые для обратных потоков функционируют как каналы дымоходные с расширяющимся профилем [10].

Выводы

Разработанный котел газогенераторный на основе пиролизного способа изготовлен для нужд небольших хозяйств и для частных домов, где есть крайне острая нужда переработки углеводородных отходов, а также отходов жизнедеятельности животноводства.

Основные преимущества котла газогенераторного на основе пиролизной технологии для переработки углеводородных отходов:

в процессе пиролиза происходит появление газов, (ароматические химические соединения), которые направляются непосредственно в топку для продолжения горения и нагрева стенок реторты для окончательной термической переработки, обеспечивая замкнутость цикла;

возможность получения вторичного сырья после переработки;

испарительная способность теплоты обребрения составляет сотую часть теплоты дымовых газов переданной влажному сырью для сушки за счет обребрения наружной поверхности реторты;

в газогенераторе по условию газификации сырья теплота на парообразование влаги топлива превышает ее испарительную способность более, чем в 100 раз.

Список использованных источников

1 Патент № 5041 на полезную модель KZ, МКИ А4 F22 В 37/10 «Котел газогенераторный» / В. Л. Исаев, М. А. Драганова, О. Ю. Кайданович (KZ) № 2020/0278,2;17.03.2020;12.06.2020; 5с.

2 Ерохин, В. Г., Маханько, М. Г. Сборник задач по основам теплотехники и гидравлики: учебное пособие. М. : Энергия, 2016. – 176 с.

3 **Литвин, А. М.** Основы теплоэнергетики. – Изд-е 9-е, перераб. и доп. – М. : Энергия, 2016. – 168 с.

4 Оборудование для утилизации отходов [Электронный ресурс]. – Режим доступа; <https://pirolizeco.ru> (дата обращения 08.10.2025).

5 **Исаев, В. Л., Драганова, М. А.** «Физико-химические основы и энерготехнологии переработки низкосортного топлива в опорных конспектах». Производство науки. Свидетельство о внесении сведений в государственный реестр прав на объекты, охраняемые авторским правом № 1382 от 18.01.2019 г. – 209 с.

6 **Asadzadeh, S. M., Andersen, N.** A predictive dynamic model of a smart cogeneration plant fuelled with fast pyrolysis bio-oil. Journal of Sustainable Development of Energy, Water and Environment Systems. 10. (2022). – P.1–36

7 **Sidorkin, V., Bersenev, K., Tugov, A., Vereshchetin, V.** Formation of Nitrogen Oxides in Combustion of Pyrolysis Gases in Air Heavily Diluted with Recirculating Flue Gas. Thermal Engineering. 66, 2019. – P. 55–62.

8 **Bezuglov, R., Volovikov, V., Papin, V., Belov, A., Dyakonov, E., Mikhaylov, V.** Investigating the process of electric power generation from generator gas obtained by solid wastes processing. Известия высших учебных заведений. Электромеханика. 67, 2024. – P. 125–133.

9 **Obodovskiy, I., Morozov, V.** The Preliminary Project Of The River Tow Vessel Powered By A Pyrolysis Gas Generator Power Plant. Problems of Friction and Wear. 2022. – P. 61–66.

10 **Ерохин, В. Г., Маханько, М. Г.** Основы термодинамики и теплотехники. Ленанд, 2019. – С. 224.

References

1 Patent No. 5041 for utility model KZ, MCI A4 F22 B 37/10 “Gas generator boiler” / V.L. Isaev, M.A. Draganova, O.Yu. Kaidanovich (KZ) № 2020/0278,2 ;17.03.2020;12.06.2020; 5с.

2 **Erokhin, V. G., Makhanko, M. G.** Collection of problems on the basics of heat engineering and hydraulics: textbook. М. : Energy, 2016. – 176 p.

3 **Litvin, A. M.** Fundamentals of thermal power engineering. – 9th Ed., reprint, and additional – М. : Energy, 2016. – 168 p.

4. Equipment for waste disposal [Electronic resource]. – pirolizeco.ru . — 2017 — Access mode; <https://pirolizeco.ru> (accessed 08.10.2025).

5 **Isaev, V. L., Draganova, M. A.** “Physico-chemical bases and energy technologies of low-grade fuel processing in reference notes”. A work of science.

Certificate of entry of information into the State register of rights to objects protected by copyright No. 1382 dated 18.01.2019 – 209 p.

6 **Asadzadeh, S. M., Andersen, N.** A predictive dynamic model of a smart cogeneration plant fuelled with fast pyrolysis bio-oil. Journal of Sustainable Development of Energy, Water and Environment Systems. 10. (2022). – P. 1–36

7 **Sidorkin, V., Bersenev, K., Tugov, A., Vereshchetin, V.** Formation of Nitrogen Oxides in Combustion of Pyrolysis Gases in Air Heavily Diluted with Recirculating Flue Gas. Thermal Engineering. 66, 2019. – P. 55–62.

8 **Bezuglov, R., Volovikov, V., Papin, V., Belov, A., Dyakonov, E., Mikhaylov, V.** Investigating the process of electric power generation from generator gas obtained by solid wastes processing. News of higher educational institutions. Electromechanics. 67, 2024. – P. 125–133.

9 **Obodovskiy, I., Morozov, V.** The Preliminary Project Of The River Tow Vessel Powered By A Pyrolysis Gas Generator Power Plant. Problems of Friction and Wear. 2022. – P. 61–66.

10 **Erokhin, V. G., Makhanko, M. G.** Fundamentals of Thermodynamics and Heat Engineering. Lenand, 2019. – P. 224.

Поступило в редакцию 18.06.25

Поступило с исправлениями 19.02.25.

Принято в печать 27.02.26.

*М. А. Драганова¹, *Е. Г. Нешина²*

^{1,2}Әбілқас Сағынов атындағы Қарағанды техникалық университеті,

Қазақстан Республикасы, Қарағанды қ.

18.06.25 ж. баспаға түсті.

19.02.25 ж. түзетулерімен түсті.

27.02.26 ж. басып шығаруға қабылданды.

ТҰРМЫСТЫҚ ҚАЛДЫҚТАРДЫ ӨНДЕУДІҢ ПИРОЛИЗ ӘДІСІНЕ НЕГІЗДЕЛГЕН ГАЗ ГЕНЕРАТОРЫ ҚАЗАНДЫҒЫ

Мақалада газ генераторының ретортындағы ылғалды шикізатты газдандырудың өзекті мәселесінің шешімі нештін жылу қуатын арттырмай, түтін газдарының жылу ретортының бетінің жылу қабылдауын арттыру арқылы ұсынылған. Реторттағы шикі шикізатты пиролиздеу кезіндегі жылу процестерінің аналитикалық

модельдерін талдау осы шикізаттың булану қабілетін және реторттың ішкі көлемі жағдайында оның ылғалының булану энтальпиясының минималды мәнін ескере отырып, реторттағы ылғалды шикізаттың булану қабілетінің артуы оның сыртқы бетін қырқу арқылы түтін газдарының жылуын реторт бетінің жылу қабылдауының жоғарылауы минималды және түтін газдарының жылуының жүзден бір бөлігін құрайды газдар. Мақала пиролиз әдісіне негізделген газ генераторының қазандығын әзірлеу мәселелеріне арналған. Шиналарды, Пластмасса бұйымдарын, мал шаруашылығы қалдықтарын және басқа да қоқыстарды қайта өңдеу-қазіргі заманның ең сұранысқа ие міндеттерінің бірі. Әзірленген Қазандық газ генераторыТүйін сөздер: газ генераторлық қазандық, газ генераторы, реторт, жылу алмасу беті, жылу беру, жылу қабылдау, жылу процестері, энтальпия, булану қабілеті, қабыршақтау, дымқыл шикізат, бу өндірісі. Пиролиз әдісіне негізделген газ генераторының әзірленген қазандығы шағын шаруашылықтардың қажеттіліктері үшін және көмірсутек қалдықтарын, сондай-ақ мал шаруашылығының қалдықтарын өңдеудің аса қажеттілігі бар жеке үйлер үшін жасалған.

Көмірсутек қалдықтарын өңдеуге арналған пиролиз технологиясына негізделген газ генератор қазандығының негізгі артықшылықтары, мысалы, электр энергиясының минималды шығыны, тұтынушыларды жылумен қамтамасыз ету үшін суды жылыту үшін қазандық қабырғаларының жылу энергиясын пайдалану.

Кілтті сөздер: газ генераторлық қазандық, газ генераторы, реторт, жылу алмасу беті, жылу беру, жылу қабылдау, жылу процестері, энтальпия.

*М. А. Draganova¹, *Y. G. Neshina¹*

^{1,2}Karaganda technical university named A.Sagynov,

Republic of Kazakhstan, Karaganda.

Republic of Kazakhstan, Kyzylorda.

Received 18.06.25.

Received in revised form 19.02.25.

Accepted for publication 27.02.26.

GAS GENERATOR BOILER BASED ON THE PYROLYSIS METHOD OF PROCESSING HOUSEHOLD WASTE

The article presents a solution to the urgent problem of gasification of wet raw materials in the retort of a gas generator by increasing the heat perception of the surface of the retort of flue gas heat without increasing the thermal capacity of the furnace. Analysis of analytical models of thermal processes during pyrolysis of raw materials in the retort, taking into account the evaporative capacity of this raw material and the minimum value of the enthalpy of vaporization of its moisture in the conditions of the internal volume of the retort, allowed us to formulate that the increase in the evaporative capacity of wet raw materials in the retort by increasing the heat perception of the surface of the retort of the heat of flue gases due to the finning of its outer surface is minimal and is one hundredth of the heat of the flue gases. The article is devoted to the development of a gas generator boiler based on the pyrolysis method. Recycling of tires, plastic products, animal waste and other garbage is one of the most popular tasks of the modern world. The developed gas generator boiler based on the pyrolysis method is manufactured for the needs of small farms and for private homes where there is an extremely urgent need for processing hydrocarbon waste, as well as animal husbandry waste.

The main advantages of a gas-generating boiler based on pyrolysis technology for processing hydrocarbon waste are described, such as minimal electricity consumption, the use of thermal energy of the boiler walls to heat water for heat supply to consumers.

Keywords: gas generator boiler, gas generator, retort, heat exchange surface, heat transfer, heat perception, thermal processes, enthalpy.

<https://doi.org/10.48081/BGQF1950>

***U. Zhalmagambetova¹, R. Tashlykova², V. Larkin³**

¹Toraighyrov University,
Republic of Kazakhstan, Pavlodar

^{2,3}NPF LLC « SevKazEnergoProm »,
Republic of Kazakhstan, Pavlodar

¹ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-2261-2222>

²ORCID: <https://orcid.org/0009-0004-7285-9305>

³ORCID: <https://orcid.org/0009-0008-2079-3358>

*e-mail: ultuara@mail.ru

DEVELOPMENT OF A MATHEMATICAL MODEL FOR TEMPERATURE DISTRIBUTION IN A HEATING SYSTEM

The mathematical mode of distribution of heat transferor fluid in order to create the digital twin of heat supply system in example Pavlodar's heat supply networks. Modeling such system permit the optimization, the parameters as temperature, pressure, flow rate and pipeline characteristics. For the example the mathematical temperatures distribution model was developed in heat supply system, based on the process of heat exchange of environment was viewed the variants of overground and underground installation. Description of temperature distribution along the length of pipeline between the network nods was applied.

The purpose of this research is creation the efficient mathematical model, which can be applied for coolant flow calculation and optimization in heat supply system. Model can be applied in engineering of new and modernization of current systems, as well as for operational management of coolant flow in real time

Main objective of research includes the analysis of existing methods and approaches in coolant flow modeling, developing mathematical model, which takes into account the peculiarities of heat supply networks, verification and validation based on experimental data.

The results of investigation can be useful for heat supply technicians, design organizations, operating companies and for scientist dealing with issues of energy efficiency and optimization the heat supply systems.

Keywords: mathematical model, digital twin, heat supply, thermal calculation, hydraulic calculation.

Introduction

Implementation of digital twin into the work of housing and communal services is rentable in order to optimize the work of heat supply system, prediction the emergencies, heightening efficiency and reduction the expanses. The use of a backup system contributes the stability of energy supply for objects with minimal spends and the anticipations of emergency changes [1].

In order to implement the digital twin in the first place is necessary to obtain adequate mathematical model of real system, which will take into account various factor and choose the optimal solutions of assigned tasks. The point of view of analysis and failure prediction it is obligatory in base of previously received and processed data letting reduce the risk for consumers and minimization of downtime and cost of servicing heating system. The possession of digital model enables testing new solutions before implementation in a real system; this will reduce the risks and costs of experiments. For consumer the digital twin will provide precise data in the shortest possible time, making maintenance more transparent increasing trust and complacency of consumers. Modeling assists to ensure that the heating system corresponds all established requirements and standards [2].

Materials and methods

First step making the adequate model is collection and analysis of initial data. By defying the parameters of heating system, including the characteristics of pipeline, pumps, heat exchangers and other elements, temperature and pressure data and reliable operation, one can begin to select a suitable modeling method.

Let us consider, as an example, the development of a mathematical model for temperatures distribution in a heating network based on the process of heat exchange with the environment [3].

Temperature distribution along the section of pipeline (feed or return) between the nodes of heating network is described by following heat transfer equation:

$$u \frac{\partial T}{\partial x} + \frac{4K}{\rho D C_p} (T - T_{env}) = 0, \quad (1)$$

where x is the coordinate along the section of a pipeline;

T is the coolant temperature (water);

ρ, C_p are the density and specific heat capacity of water;

D is the internal diameter of pipeline;

u is the average flow velocity across the cross-section of a pipe expressed in terms of water consumption q : $u = \frac{q}{0.25\pi D^2}$;
 K is the heat exchange coefficient from the coolant flow to the environment;
 T_{env} is the temperature of the environment

The equation has the following solution, called Shukhov's formula:

$$T(x) = T_{env} + (T_0 - T_{env})e^{-\frac{\pi \rho K D x}{q C_P}} \quad (2)$$

The value of K is defined from following ratios:

$$\frac{1}{K\pi D} = R = R_{in} + R_{ins} + R_{out} \quad (3)$$

where R is the general thermal resistance of heat transfer pipe;

R_{in} is the thermal resistance heat transfer from the coolant to the pipe wall;

R_{ins} is the thermal resistance of the pipe insulation coating;

R_{out} is the thermal resistance from the outer surface of the pipe to the external environment.

The value R_{in} was defined by means of the Nusselt number Nu , expressed via Reynolds number Re and Prandtl number Pr [4]:

$$R_{in} = \frac{1}{\lambda_w \pi Nu}, \quad Nu = 0.021 \cdot (Re)^{0.8} \cdot (Pr)^{0.43} \quad (4)$$

$$Re = \frac{uD}{\nu}, \quad Pr = \frac{\nu \rho C_P}{\lambda_w}$$

where λ_w is the thermal conductivity of water;

ν is the kinematic viscosity of water.

The R_{ins} value was determined from the parameters of isolation coating:

$$R_{ins} = \frac{1}{2\pi \lambda_{ins}} \ln \frac{D_2}{D_1} \quad (5)$$

where D_1, D_2 are internal and external diameters of the pipeline insulation coating layer;

λ_{ins} is the thermal conductivity coefficient of the insulation layer.

The T_{env} value in formula (2) and the R_{out} value in ratio (3) were determined depending on the type of pipeline installation (overground, underground channelless and underground channel). As a rule, each sector of the heating network contains two pipes: supply and return pipes, which have various temperatures of the coolant. In contrast with underground, the overground insulation the influence of temperature field parallel to the pipe laid (adjacent) to the pipe in question was not considered [4].

Results and consideration

For above-ground pipeline installation, the outside air was considered as the ambient air, the value was calculated using the following formula [5]:

$$T_{env} = T_{air}, \quad R_{out} = \frac{1}{\alpha_{air} \pi D_2}, \quad \alpha_{air} = 11.6 + \sqrt{w}, \quad (6)$$

where α_{air} is the coefficient of heat transfer from the outer surface of the pipe to the surrounding air;

w is the wind velocity;

T_{air} is the outside air temperature.

For above-ground pipeline installation, the outside air was considered as the ambient air, the value R_{out} was calculated using the following formula [6]:

$$T_{env} = T_{gr}, \quad \frac{T_{avg} - T_{gr}}{R_{out}} = \frac{(T_{avg} - T_{gr})\bar{R}_0 - (\bar{T}_{avg} - T_{gr})R_0}{R_0\bar{R}_0 - R_{inf}^2} \quad (7)$$

$$R_{inf} = \frac{1}{2\pi \lambda_{gr}} \ln \sqrt{1 + \left(\frac{2H}{s}\right)^2}$$

where: T_{ar} is the soil temperature

$T_{avg}, \bar{T}_{avg}$ are the average mean of temperatures respectively; considered and neighboring pipes;

R_{inf} is the additional thermal resistance of heat transfer between two pipes in the ground;

λ_{gr} is the thermal conductivity coefficient of the surrounding soil;

H is the depth of the pipeline to its axis;

s is the the distance between the axes of the pipe in question and the adjacent pipe;

$R_0, \bar{R}_0$ are the total thermal resistances of the pipe in question and the adjacent pipe without taking into account the mutual influence of their temperature fields.

The values $R_0, \bar{R}_0$ are calculated using formula, where corresponding $R_{out}, \bar{R}_{out}$ values $R_{out}, \bar{R}_{out}$ are equal to the thermal R_{gr} soil resistance R_{gr} , which is determined using Forchheimer formula [7]:

$$R_{gr} = \frac{1}{2\pi\lambda_{gr}} \ln \left(\frac{2H}{D_2} + \sqrt{\left(\frac{2H}{D_2}\right)^2 - 1} \right) \quad (8)$$

When laying a pipeline underground in a channel, the air in the channel was considered as the environment, the R_{out} value was calculated as the sum of the thermal resistances of successive heat transfers in the channel:

$$\begin{aligned} T_{env} &= T_{air}^{can}, & R_{out} &= R_{air}^{can} + R_{wall}^{can} + R_{gr}^{can} \\ R_{air}^{can} &= \frac{1}{\alpha_{air}^{can} \pi D_2}, & R_{wall}^{can} &= \frac{1}{\alpha_{air}^{can} \pi D_{can}}, & D_{can} &= \frac{2d_{can}h_{can}}{d_{can} + h_{can}} \\ R_{gr}^{can} &= \frac{\ln \left(3.5 \frac{Hh_{can}}{d_{can}^2} \right)}{\lambda_{gr} \left(5.7 + \frac{d_{can}}{2h_{can}} \right)} \end{aligned} \quad (9)$$

where $R_{air}^{can}, R_{wall}^{can}, R_{gr}^{can}$ are the values of corresponding thermal resistances: heat exchange from the surface of the insulated pipeline into the air space of the channel, heat exchange from the air to the ground, heat exchange around the channel; α_{air}^{can} is the heat exchange coefficient of air in the channel, according to [8] was accepted $8 \text{ W}/(\text{m}^2 \times ^\circ\text{C})$

$D_{can}, d_{can}, h_{can}$ is the equivalent diameter, width and height of channel

T_{air}^{can} is the channel air temperature, which was calculated according to the next ratio for thermal resistances:

$$\frac{T_{air}^{can} - T_{avg}}{R_{ins} + R_{air}^{can}} + \frac{T_{air}^{can} - \bar{T}_{avg}}{\bar{R}_{ins} + \bar{R}_{air}^{can}} + \frac{T_{air}^{can} - T_{gr}}{R_{wall}^{can} + R_{gr}^{can}} = 0 \quad (10)$$

Where $\bar{R}_{ins}, \bar{R}_{air}^{can}$ are the corresponding values of thermal resistances (insulation coating and heat transfer from the surface of pipe into the air space of the channel) [9].

As can be seen from the formulas (7)–(10) calculating temperature at the end of an underground pipe section requires calculating the water temperatures in adjacent

pipe, which also depends on the temperature in the pipe in question. Therefore, during underground installation, an iterative process is used to calculate the final temperature of the section until the required accuracy is achieved [10].

Financing information

This research was funded by the Science Committee of the Ministry of Science and Higher Education of the Republic of Kazakhstan (Grant № BR24992907 for 2024-2026)

Conclusions

A formatted mathematical model of the relationship between heat supply system parameters was defined, serving as the basis for developing a flow calculation algorithm considering various system operation scenarios. Using the initial temperature T_0 at the inlet pipe of a section of the heating network and coolant flow rate q through this section, the corresponding final temperatures T_{end} were determined using formulas (9)–(11).

Temperature distribution across the entire heating network was defined using breadth-first search (graph traversal method), beginning from the nodes of heating network (thermal power plants, heating plants), for which temperatures in outlet were set. The heating network nodes were bypassed in the positive direction of flow ($q > 0$). When bypassing the heating network nodes, the temperature T_0 at the inlet of subsequent sections of the heating network (the temperature at the outlet of the initial node of the section) was calculated based on the thermal energy balance:

$$T_0 = \frac{\sum_{i=1}^n (q_i \cdot (T_{end})_i)}{\sum_{i=1}^n q_i} - \Delta T \quad (11)$$

where n is the number of nodes in heating network from which the flow comes to the current node;

$q_i, (T_{end})_i$ is the values of water flow rate and final temperature at the i -th section of the pipe entering the current node;

ΔT is the temperature loss in current node.

If the current node is a consumer in heat supply system, then $\Delta T > 0$, otherwise $\Delta T = 0$.

The software code for solving the problem of temperature distribution in a heating network based on heat exchange with the environment was written in C# and implemented as a separate software module within the System. Implementing a digital twin using the calculated model will enable real-time diagnostics of the heating system's condition, determining process parameters at any given time, and predicting parameter fluctuations and emergency situations.

References

- 1 СП РК 4.02-108-2014 Проектирование тепловых пунктов. – Астана, 2017.
- 2 **Billerbeck, A., Breitschopf, B. J.** Policy frameworks for district heating: A comprehensive overview and analysis of regulations and support measures across Europe // *Energy Policy*. – Vol. 173. – February 2023. – 113377. – <https://doi.org/10.1016/j.enpol.2022.113377>
- 3 **Агапкин, В. М.** Тепловой и гидравлический расчеты трубопроводов для нефти и нефтепродуктов. – М. : Недра, 1981. – 256 с.
- 4 **Averfalk, H., Werner, S.** Economic benefits of fourth generation district heating. *Energy*. – Vol. 193. – 15 February, 2020. – 116727. – <https://doi.org/10.1016/j.energy.2019.116727>.
- 5 Ma, Z., Knotzer A., A literature review of energy flexibility in district heating with a survey of the stakeholders' participation. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, Vol. 123, May 2020, 109750. doi: <https://doi.org/10.1016/j.rser.2020.109750>
- 6 Идельчик, И.Е., Справочник по гидравлическим сопротивлениям // «Машиностроение», 1992г., М.
- 7 **Меренков, А.П., Хаселев, В. Я.** Теория гидравлических цепей. – Издательство «Наука», 1985.
- 8 **Коршак, А. А.** Универсальность обобщенной формулы Л. С. Лейбензона / А. А. Коршак // Нефтяное хозяйство. – 2019. – № 5. – С. 105–108. – Библиогр.: с.108 (17 назв.). – ISSN 0028-2448
- 9 **Берж, К.** Теория графов и ее применения. // Изд-во иностр.лит. – 1962. 320 с.
- 10 **Maurer, J., Ratzel, O. M., Malan, A. J., Hohmann S.** Comparison of discrete dynamic pipeline models for operational optimization of District Heating Networks. *Energy Reports*. – Vol. 7. – Supplement 4, October 2021. – P. 244–253. – <https://doi.org/10.1016/j.egyr.2021.08.150>

References

- 1 P RK 4.02-108-2014 Projektirovaniye teblovykh punktov [Code of Practice of the Republic of Kazakhstan 4.02-108-2014 Design of heating stations]. – Astana, 2017.
- 2 **Billerbeck A., Breitschopf, B. J.** Policy frameworks for district heating: A comprehensive overview and analysis of regulations and support measures across Europe. *Energy Policy*. – Vol. 173. – February, 2023. – 113377. – <https://doi.org/10.1016/j.enpol.2022.113377>

- 3 **Agapkin, V. M.** Teplovoy i gidravlicheskiy raschety truboprovodov dlya nefi i nefteproduktov. [Thermal and Hydraulic Calculations of Pipelines for Oil and Petroleum Products]. – Moscow : Nedra, 1981. – 256 p.
- 4 **Averfalk, H., Werner, S.** Economic benefits of fourth generation district heating. *Energy*, Vol. 193, 15 February 2020, 116727. – <https://doi.org/10.1016/j.energy.2019.116727>
- 5 **Ma, Z., Knotzer, A.** A literature review of energy flexibility in district heating with a survey of the stakeholders' participation. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. – Vol. 123. – May, 2020. – 109750. – <https://doi.org/10.1016/j.rser.2020.109750>
- 6 **Idelchik, I. Ye.** Spravochnik po gidravlicheskim soprotivleniyam [Handbook of hydraulic resistance] // Mechanical engineering. – Moscow, 1992.
- 7 **Mererkov, A. P., Khaselev V. Ya.** Teoriya Gidravlicheskiy tsepei. [Theory of hydraulic circuits]. – «Nauka» publishing office. – 19857
- 8 **Korshak, A. A.** Universalnost' obobshchonnoy formuly L.S.Leybensona [The universality of generalized Leybeson's formula] / A.A.Korshak // Oil industry – 2019. – № 5. – P. 105–108. – Bibliogr.: p.108 (17 titles.). – ISSN 0028-2448
- 9 **Berzh, K.** Teoriya graphov i eyo primeneniye. [Graph theory and its application] // Publishing house of foreign lit. – 1962. – 320 p.
- 10 **Maurer, J., Ratzel, O. M., Malan, A. J., Hohmann S.** Comparison of discrete dynamic pipeline models for operational optimization of District Heating Networks. *Energy Reports*. – Vol. 7. – Supplement 4, October, 2021. – P. 244–253. – <https://doi.org/10.1016/j.egyr.2021.08.150>

Received 08.01.26.

Received in revised form 20.01.26.

Accepted for publication 27.02.26.

*Ұ. К. Жалмағамбетова¹, Р. В. Ташлыкова², В. А. Ларкин³¹Торайғыров университеті,

Қазақстан Республикасы, Павлодар қ.;

^{2,3}«СевКазЭнергоПром»НПФ ЖШС,

Қазақстан Республикасы, Павлодар қ.

08.01.26. ж. баспаға түсті.

20.01.26. ж. түзетулерімен түсті.

27.02.26. ж. басып шығаруға қабылданды.

ЖЫЛУ ЖЕЛІСІНДЕГІ ТЕМПЕРАТУРАНЫ БӨЛҮДІН МАТЕМАТИКАЛЫҚ МОДЕЛІН ЖАСАУ

Бұл мақалада Павлодар жылу желілерінің мысалын қолдана отырып, жылу жүйесінің сандық егізін жасау үшін салқындатқыш ағынының таралуының математикалық моделі қарастырылады. Мұндай жүйелерді модельдеу температура, қысым, ағын жылдамдығы және құбыр сипаттамалары сияқты әртүрлі параметрлерді ескере отырып, салқындатқыштың таралуын оңтайландыруға мүмкіндік береді. Бұл мысал үшін қоршаған ортамен жылу алмасуына негізделген жылу желісіндегі температураның таралуының математикалық моделі жасалды және жер үсті және жер асты (құбыр) орнату нұсқалары қарастырылды. Желі түйіндері арасындағы құбырдың ұзындығы бойынша температураның таралуының сипаттамасы пайдаланылды.

Зерттеудің мақсаты – жылу жүйелеріндегі салқындатқыш ағындарын есептеу және оңтайландыру үшін пайдалануға болатын тиімді математикалық модельді жасау. Модельді жаңа жүйелерді жобалауға және қолданыстағы жүйелерді жаңғыртуға, сондай-ақ нақты уақыт режимінде салқындатқыш ағындарын жедел басқаруға қолдануға болады.

Зерттеудің негізгі мақсаттарына салқындатқыш ағынын модельдеудің қолданыстағы әдістері мен тәсілдерін талдау, жылу желілерінің нақты сипаттамаларын ескере отырып, математикалық модельді әзірлеу және эксперименттік деректерге негізделген модельді тексеру және валидациялау кіреді. Зерттеу нәтижелері жылумен жабдықтау мамандары, жобалау ұйымдары, пайдалану компаниялары және жылумен жабдықтау жүйелерінің энергия тиімділігі мен оңтайландыруы бойынша жұмыс істейтін зерттеушілер үшін пайдалы болуы мүмкін.

Кілтті сөздер: математикалық модель, сандық егіз, жылумен қамту, жылулық есептеу, гидравликалық есептеу.

*У. К. Жалмағамбетова¹, Р. В. Ташлыкова², В. А. Ларкин³

¹Торайғыров университет,
Республика Казахстан, г. Павлодар;

^{2,3}ТОО НПП «СевКазЭнергоПром»,
Республика Казахстан, г. Павлодар

Поступило в редакцию 08.01.26.

Поступило с исправлениями 20.01.26.

Принято в печать 27.02.26.

РАЗРАБОТКА МАТЕМАТИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ РАСПРЕДЕЛЕНИЯ ТЕМПЕРАТУР В ТЕПЛОСЕТИ

В работе рассматривается математическая модель распределения потоков теплоносителя, для создания цифрового двойника системы теплоснабжения на примере тепловых сетей города Павлодар. Моделирование таких систем позволяет оптимизировать распределение теплоносителя с учётом различных параметров, таких как температура, давление, расход и характеристики трубопроводов. Для примера разработана математическая модель распределения температур в теплосети исходя из процесса теплообмена с окружающей средой, рассмотрены варианты надземной и подземной (канальной) прокладки. Использовано описание распределение температуры по длине трубопровода между узлами сети.

Целью исследования является создание эффективной математической модели, которая может быть использована для расчёта и оптимизации потоков теплоносителя в системах теплоснабжения. Модель может применяться для проектирования новых и модернизации существующих систем, а также для оперативного управления потоками теплоносителя в реальном времени.

Основные задачи исследования включают анализ существующих методов и подходов к моделированию потоков теплоносителя, разработку математической модели с учётом особенностей тепловых сетей, а также верификацию и валидацию модели на основе экспериментальных данных.

Результаты исследования могут быть полезны для специалистов в области теплоснабжения, проектных организаций, эксплуатирующих компаний и исследователей, занимающихся вопросами энергоэффективности и оптимизации систем теплоснабжения.

Ключевые слова: математическая модель, цифровой двойник, теплоснабжение, тепловой расчет, гидравлический расчет.

<https://doi.org/10.48081/BGQF1951>

***А. О. Жанпейісова¹, Е. А. Сарсенбаев²,
А. С. Тлешова³, А. С. Әбілдаева⁴, А. А. Омарова⁵**

^{1,2}Қ. И. Сәтбаев атындағы Қазақ ұлттық зерттеу техникалық университеті,
Қазақстан Республикасы, Алматы қ.

^{3,4}М. Х. Дулати атындағы Тараз университеті,
Қазақстан Республикасы, Тараз қ.

⁵Л. Н. Гумилев атындағы Еуразия ұлттық университеті,
Қазақстан Республикасы, Астана қ.

¹ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-5040-428X>

²ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-8887-1171>

³ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-4594-5265>

⁴ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-3752-5607>

⁵ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-5663-4414>

*e-mail: Ayzhan.zhanpeisova@mail.ru

КҮН ЖӘНЕ ЖЕЛ ЭНЕРГЕТИКАСЫ ЖҮЙЕЛЕРІНДЕ ЛИТИЙ-ИОНДЫ АККУМУЛЯТОРЛАРДЫҢ ТИІМДІЛІГІН АРТТЫРУ ЖОЛДАРЫ

Қазіргі таңда жаңғыртылатын энергия көздерін пайдалану – әлемдік энергетикалық өтпелі кезеңнің стратегиялық бағыты болып табылады. Әсіресе күн және жел энергетикасы секторы тұрақсыздық пен маусымдық ауытқуларға бейім болғандықтан, энергияны тиімді әрі ұзақ мерзімді сақтау мәселесі өзекті сипатқа ие. Осы тұрғыдан алғанда, жоғары өнімді литий-ионды аккумуляторлар – энергияны жинақтау және тұрақтандырудың негізгі шешімі ретінде кеңінен қарастырылуда.

Бұл мақалада литий-ионды аккумуляторлардың тиімділігін арттыруға бағытталған заманауи ғылыми-техникалық тәсілдер талданады. Негізгі назар аккумулятордың анод және катод материалдарын жетілдіруге, атап айтқанда графиттің орнына кремнийді, ал кобальт негізді материалдарды экологиялық таза баламалармен алмастыруға аударылады. Сонымен қатар энергия тығыздығын арттыру, электролиттердің термиялық

тұрақтылығын қамтамасыз ету және заряд/разряд циклдарының ұзақтығын көбейту мәселелері қарастырылады.

Мақалада сондай-ақ литий-ионды аккумуляторлардың жаңғыртылатын энергия көздерімен интеграциялану ерекшеліктері мен техникалық шектеулері нақты мысалдар арқылы сипатталады. Зерттеу нәтижелері аккумулятор технологияларын жетілдіру жаңғыртылатын энергияның тұрақты әрі сенімді жұмысын қамтамасыз етіп, экологиялық қауіпсіз энергия сақтау жүйелерін қалыптастыруға мүмкіндік беретінін көрсетеді.

Осылайша, литий-ионды аккумуляторлар – болашақтағы төмен көміртекті энергетика жүйесінің ажырамас элементі ретінде қарастырылады.

Кілтті сөздер: Литий-ионды аккумуляторлар, жаңғыртылатын энергия көздері, күн энергетикасы, жел энергетикасы, энергия сақтау жүйелері, анод және катод материалдары.

Kіріспе

Қазіргі заманда энергетика саласында болып жатқан жаһандық өзгерістер мен климаттың өзгеруіне байланысты туындаған экологиялық проблемалар жаңғыртылатын энергия көздерін (күн, жел, геотермалдық, биомасса және т.б.) кеңінен қолдануға алып келді. Әсіресе күн мен жел энергетикасы – қолжетімділігі, қоршаған ортаға зиян келтірмейтіндігі және сарқылмайтын табиғи ресурс ретінде болашағы зор бағыттар саналады.

Алайда жаңғыртылатын энергия көздерінің негізгі кемшілігі - энергия өндірісінің тұрақсыздығы. Мысалы, күн энергиясы тек күндізгі уақытта, ал жел энергиясы желдің жылдамдығына байланысты өндіріледі. Осыған байланысты энергияны тиімді әрі ұзақ мерзімді сақтау қажеттілігі туындайды. Бұл мәселенің шешімі ретінде әртүрлі энергия сақтау жүйелері қарастырылуда, олардың ішінде ең кең таралғаны - литий-ионды аккумуляторлар [1].

Литий-ионды аккумуляторлар жоғары энергия тығыздығына, ұзақ қызмет ету мерзіміне және қайталама зарядталу мүмкіндігіне ие. Дегенмен, қазіргі қолданыстағы аккумуляторлар жүйелері әлі де бірнеше техникалық шектеулерге ие: зарядталу/разрядталу циклдарының шектеулілігі, температура тұрақсыздығы, материалдық шығындылық және қауіпсіздік мәселелері. Осы проблемаларды шешу арқылы литий-ионды аккумуляторларды жетілдіру жаңғыртылатын энергия көздерін тиімді пайдалану мүмкіндігін арттырады.

Литий-ионды аккумуляторларды жетілдіру - жаңғыртылатын энергия жүйелерінің тұрақты жұмыс істеуі мен кеңінен таралуының басты алғышарттарының бірі. Бұл зерттеу практикалық тұрғыдан келесі мәселелерді шешуге мүмкіндік береді [2]:

- Жаңғыртылатын энергия көздерінен алынған артық энергияны ұзақ мерзімді және сенімді түрде сақтау;
- Күн және жел электр станцияларының жұмысын тұрақтандыру;
- Жоғары температура мен төмен температура жағдайында аккумуляторлардың қауіпсіздігін арттыру;
- Энергия сақтау жүйелерінің техникалық және экономикалық тиімділігін жақсарту;
- Қазақстанда және басқа елдерде баламалы энергетиканы кеңінен енгізуге негіз болу.

Сонымен қатар, зерттеу нәтижелері энергия сақтау саласындағы өндірістік компаниялар мен инженерлерге, энергетика саясатын жасаушы мамандарға, ғылыми-техникалық мамандар мен студенттерге пайдалы болуы мүмкін.

Бұл зерттеудің басты мақсаты - күн және жел энергетикасы жүйелерінде қолданылатын литий-ионды аккумуляторлардың техникалық сипаттамаларын жақсарту жолдарын зерттеу және олардың энергия сақтау тиімділігін арттыру мүмкіндіктерін ғылыми тұрғыда негіздеу.

Материалдар мен әдістері

Бұл зерттеуде литий-ионды аккумуляторлар күн және жел энергетикасы жүйелерінде энергия сақтау құралы ретінде қарастырылады. Нақты зерттеу объектісі ретінде әртүрлі анод және катод материалдарынан жасалған литий-ионды аккумуляторлар үлгілері алынған, сондай-ақ олардың термиялық және заряд/разряд сипаттамалары салыстырмалы түрде талданған [3].

Қолданылған материалдар:

Зерттеу барысында келесі негізгі материалдар мен компоненттер пайдаланылды:

Анод материалдары:

- Графит (дәстүрлі);
- Кремний-негізді анод (жетілдірілген нұсқа).

Катод материалдары:

- Литий-кобальт оксиді (LiCoO₂);
- Литий-темір-фосфат (LiFePO₄);
- Литий-никель-марганец-кобальт оксиді (NMC, LiNiMnCoO₂).

Электролиттер:

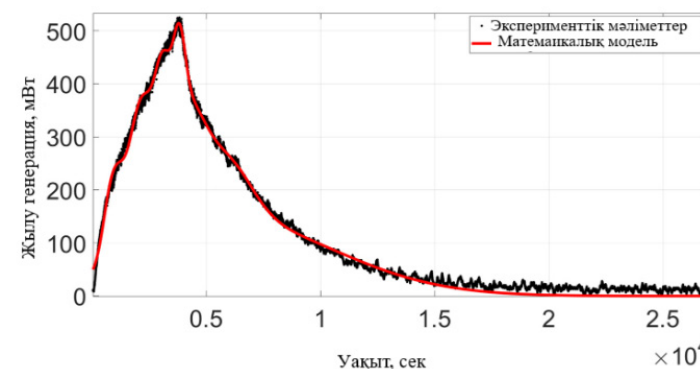
- Сұйық органикалық электролиттер (LiPF₆ тұздары негізінде);

- Жаңа буындағы қатты электролиттер (зертханалық жағдайда).

Бөліп тұратын сепараторлар.

Жылу оқшаулағыш қабықшалар (термиялық тұрақтылықты зерттеу үшін).

1-суретте литий-ионды аккумуляторлар үшін жылу өндіру үлгісі көрсетілген. Литий-ионды аккумуляторды термиялық модельдеу сәтті орындалды, бұл батарея ұяшығының теріс қойындысының жанындағы аймақ зарядсыздандыру процесі кезінде ең жоғары температураны сезінді.



1-сурет – Жылу генерациясының уақытқа тәуелділігін сипаттайды [4]

1-ші суретте, жылу генерациясы (ЖГ) бастапқыда тез өседі. Графиктің басында ЖГ мәні 0-ден 500 мВт-қа дейін күрт көтеріледі. Бұл жүйеде бастапқыда үлкен жылу бөлінуін көрсетеді (мүмкін химиялық реакцияның басталуы немесе батарея разряды басталған сәт).

Максимум нүкте. Шамамен 5000 секундқа (0.5×10^4) келгенде жылу генерациясы максимумға жетеді (~510 мВт). Кейін жылу біртіндеп азаяды. Уақыт өте келе жылу генерациясы экспоненциалды түрде төмендейді, бұл жүйенің суынуын немесе реакция баяулауын сипаттайды.

Модель мен деректердің сәйкестігі жақсы болып келеді. Қызыл сызық (модель) пен қара нүктелер (эксперимент) бір-біріне өте жақын, бұл модельдің дәлдігін көрсетеді.

Зерттеу әдістері

1) Зертханалық сынақтар

Зерттеу үлгілері арнайы аккумуляторлық тестілеу жабдықтарында сынақтан өткізілді:

Заряд/разряд циклдары

– Әр аккумулятор 0.5C, 1C және 2C токтарымен 100 цикл бойы зарядталып/разрядталды.

– Әр циклдан кейінгі сыйымдылық, тиімділік (%) және ішкі қарсылық көрсеткіштері өлшенді.

Термиялық тұрақтылықты сынау

Аккумуляторлар 25 0C, 45 0C және 60 0C температурада сынақтан өткізілді.

Температураның әсері энергия сыйымдылығына және деградация жылдамдығына талдау жасалды.

Энергия тығыздығын есептеу

– равиметриялық (Вт·сағ/кг) және көлемдік (Вт·сағ/л) тығыздықтары анықталды.

– Өртүрлі материалдар арасындағы салыстырмалы тиімділік көрсеткіштері есептелді.

2) Моделдеу әдістері

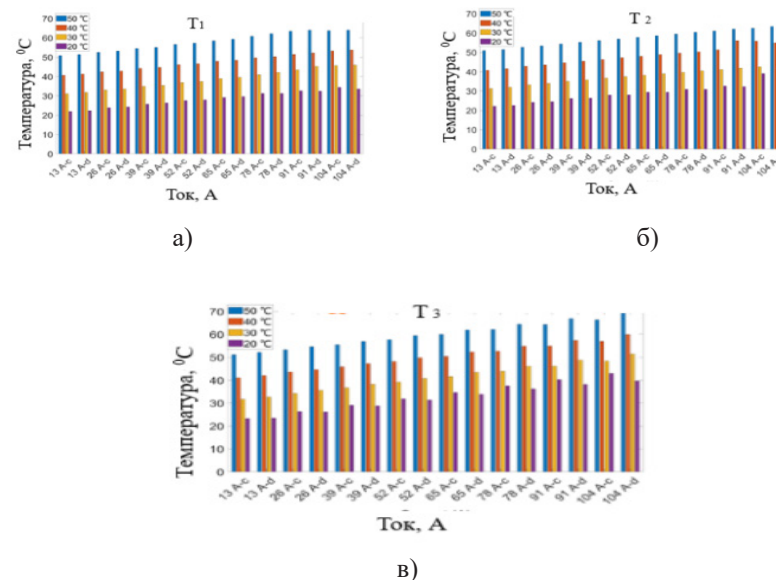
– MATLAB/Simulink бағдарламасы арқылы литий-ионды аккумуляторлардың күн және жел энергия жүйелеріне интеграциялануы модельденді.

– Энергия өндірудің ауытқымалы графигі негізінде аккумулятордың тиімділігі, заряд/разряд жылдамдығы және сақтау тұрақтылығы есептелді.

3) Салыстырмалы талдау

– Зерттеу нәтижелері қазіргі қолданылып жүрген аккумулятор үлгілерімен салыстырылды.

– Жаңа материалдар мен жетілдірілген конфигурациялармен алынған нәтижелер техникалық және экономикалық тұрғыдан бағаланды.



2-сурет – Жүйенің температураға және токқа байланысты өзгеруі

Жүйе бастапқы температурасы артқан сайын (мысалы, 20 0C – 50 0C), кейбір сынақтарда жылу генерациясы да артады. Әсіресе кейбір шарттарда (мысалы, 10A-9.5C – 50 °C кезінде өте үлкен жылу мөлшері байқалады). Бұл жылу мөлшері ток пен температура жоғары болғанда, және температура артқанда көбірек болатынын көрсетеді [5;6;7].

Бұл 3 график – әртүрлі температуралық нүктелерде (T1, T2, T3) өлшенген нәтижелер. Бұл нүктелер батарея немесе құрылғының әртүрлі жерлеріндегі температураны білдіреді.

2 – а, суретте температура жоғары токтарда көбірек артады. 50 0C бастапқы температурада соңғы температуралар да ең жоғары. Бұл нүкте, шамамен, батарея беті немесе бетке жақын аймақта болуы мүмкін.

2 – б, суретте температура T1-ге ұқсас бағытта өзгереді, бірақ сәл төмен мәндер көрсетіледі. Бұл - орта аймақ болуы мүмкін (не бет пен ортаның арасында).

2 – в, суретте температура T1-ге ұқсас бағытта өзгереді, бірақ сәл төмен мәндер көрсетіледі. Бұл – орта аймақ болуы мүмкін (не бет пен ортаның арасында).

Сонда ток жоғарылаған сайын температура мен жылу мөлшері артады. Жоғары температурада жүйе көбірек жылу бөледі.

Жылу генерациясының негізгі көзі - жұмыс істеп тұрған батареядағы ішкі процестер:

$$Q_{\text{жалпы}} = Q_{\text{Джоуль}} + Q_{\text{қайт-ды}} + Q_{\text{қайт-з}} \quad (1)$$

мұндағы, $Q_{\text{Джоуль}}$ – Джоульдік жылу;

$Q_{\text{қайт-ды}}$ – қайтымды жылу;

$Q_{\text{қайт-з}}$ – қайтымсыз жылу.

Джоульдік жылу – ол ішкі қарсылық әсерінен туындайды:

$$Q_{\text{Джоуль}} = I^2 \cdot R_{\text{инк}} \quad (2)$$

мұндағы, I – ток, А;

$R_{\text{қайт-ды}}$ – батареяның ішкі кедергісі (Ом). Ол температураға тәуелді болуы мүмкін.

$$R_{\text{инк}}(T) = R_0 \cdot e^{\beta \frac{1}{T}} \quad (3)$$

Қайтымды жылу – Электрохимиялық реакциядағы энтропиялық өзгеріске байланысты:

$$Q_{\text{қайт-ды}} = I \cdot T \cdot \left(\frac{\partial E}{\partial T} \right) \quad (4)$$

мұндағы, T – температура, К;

E – ашық тізбекті кернеу;

$\left(\frac{\partial E}{\partial T} \right)$ – температураға тәуелді кернеудің өзгерісі (энтропиялық коэффициент).

Жалпы жылу генерация теңдеуі:

$$Q_{\text{генер}} = I^2 \cdot R_{\text{инк}} + I \cdot T \cdot \left(\frac{\partial E}{\partial T} \right) \quad (5)$$

Температураның уақыт бойынша өзгерісі (жылу таралуы) – бұл генерацияланған жылу жүйе ішінде қалай тарайтынын сипаттайды.

Жылу таралу теңдеуі:

$$\rho \cdot c_p \cdot \frac{\partial T}{\partial t} = \nabla \cdot (k \nabla T) + Q_{\text{генер}} \quad (6)$$

мұндағы, ρ – тығыздық, кг/м³;

c_p – меншікті жылу сыйымдылығы, Дж/(кг×К);

k – жылу өткізгіштік, (Вт/(м×К));

T – температура, К;

$Q_{\text{генер}}$ – жоғарыда анықталған генерация жылуы, (Вт/м³).

Сонда, тиімділікті арттыру үшін жылуды басқару жолдары:

1) Жылу өткізгіштігі жоғары материалдар қолдану. Электрод, ток жинағыш, сыртқы қабық сияқты бөліктерде жылу өткізгіш материалдар қолдану (мысалы, мыс, алюминий, графит). Бұл жылудың тез тарауына көмектеседі.

2) Жылу тарату жүйелерін қолдану:

– Сұйықтықпен салқындату;

– Ауа арқылы салқындату;

– Фазалық ауысу материалдары.

Бұл жүйелер батарея температурасын оптималды диапазонда ұстап тұрады (әдетте 20–40 °С).

3) Батареяны дұрыс орналастыру. Пакет ішіндегі батареялар арасында жылу аралығын сақтау. Қызған батарея бөліктерінен жылудың таралуын болдырмау үшін тепе-тең симметриялы орналастыру.

4) Жылуды аз тудыратын жұмыс режимдері. Өте жоғары заряд/разряд жылдамдығы көп жылу шығарады. Пайдалану кезінде ақылды басқару жүйелері, температураға қарап автоматты ток шектеу болады.

Нәтижелер және талқылау

1) Заряд/разряд циклының нәтижелері.

Зертханалық сынақтар нәтижесінде литий-ионды аккумуляторлардың әртүрлі анод және катод материалдары негізінде жасалған үлгілерінің заряд/разряд тиімділігі мен циклдық тұрақтылығы анықталды.

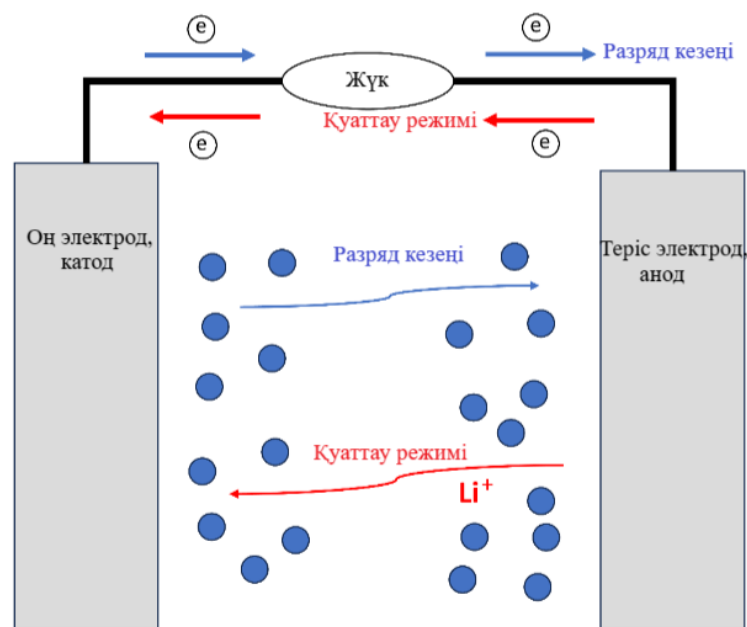
Графит-анодты аккумуляторлар 100 циклдан кейін бастапқы сыйымдылықтың ~85 %-ын сақтап қалды.

Кремний-анодты аккумуляторлар жоғары бастапқы энергия сыйымдылығын көрсетті, алайда 100 циклдан кейін сыйымдылықтың тек

~75 %-ы ғана сақталды, бұл материалдың құрылымдық тұрақсыздығымен байланысты.

Катод материалдарының ішінде LiFePO_4 термиялық тұрақтылығы мен қауіпсіздігі жағынан үздік нәтиже көрсетті, бірақ энергия тығыздығы төмен ($160 \text{ Вт} \cdot \text{сағ/кг}$).

LiNiMnCoO_2 негізіндегі аккумуляторлар - жоғары энергия тығыздығы ($200\text{--}250 \text{ Вт} \cdot \text{сағ/кг}$) және салыстырмалы тұрақты циклдық жұмыс көрсетті.



3-сурет – Литий-ионды аккумулятордың жұмыс принципін зарядтау) және разряд кезеңдері

3-суретте көрсетілгендей, литий-ионды батарея үш негізгі бөліктен тұрады:

Оң электрод – катодтан;

Теріс электрод – анодтан;

Электролит және сепаратор – литий иондарының (Li^+) қозғалысын қамтамасыз етеді, бірақ электрондарды өткізбейді.

Сыртқы тізбекте жүк жалғанған, яғни батарея қуат беріп тұр немесе қуатталып жатыр.

Разряд кезеңінде Литий иондары (Li^+) анодтан - катодқа қарай электролит арқылы қозғалады. Электрондар (e^-) сыртқы тізбекпен теріс электродтан оң электродқа қарай ағады (электр тогы пайда болады). Бұл процесте құрылғы (жүк) энергия алады. Ал қуаттау режимінде, яғни зарядтау режимінде батарея сыртқы қуат көзінен зарядталады (мысалы, тоқ көзіне қосылған). Онда сыртқы ток көмегімен литий иондары катодтан - анодқа өтеді. Электрондар да сыртқы тізбекпен оң электродтан - теріс электродқа ағады. Бұл кезде иондар мен электрондар қайта анодта жиналып, батарея «қор жинайды».

Катод пен анод комбинациясы тұрақтылық пен қуаттылық арасындағы тиімді компромиссті көрсетеді [8].

2) Температуралық тұрақтылық нәтижелері.

Заряд/разряд процесі 20°C , 40°C және 50°C температурада өткізілді (2-сурет):

20°C жағдайда барлық аккумуляторлар қалыпты жұмыс режимінде жоғары тиімділік көрсетті ($92\text{--}97\%$).

40°C температурада кейбір үлгілерде ішкі қарсылықтың артқаны байқалды, бірақ жалпы өнімділік төмендеген жоқ.

50°C температурада LiCoO_2 катоды бар аккумуляторлар қызу мен газ бөліну нәтижесінде қауіпсіздік шектерінен асты. Ал LiFePO_4 және қатты электролит негізіндегі үлгілер тұрақты жұмыс істеді.

Температураның жоғарылауы аккумулятордың ішкі химиялық процестерін жылдамдатады, бұл энергия жоғалуына және қауіпсіздік қатеріне алып келеді. Жоғары температурада жұмыс істеуге ең қолайлы – LiFePO_4 катодтары және қатты электролиттер [9].

3) Энергия тығыздығының талдауы

№	Материал комбинациясы	Энергия тығыздығы, $\text{Вт} \cdot \text{сағ/кг}$	Цикл тұрақтылығы, % (100 циклдан кейін)
1	LiFePO_4	160	90
2	Кремний	270	75
3	LiCOO^2	200	80

Энергия тығыздығы бойынша кремний үлгілері көшбасшы болса да, олардың циклдық тұрақтылығы төмен. Ал LiFePO_4 комбинациясы қауіпсіздік пен ұзақ қызмет мерзімі жағынан тиімді.

4) Моделдеу нәтижелері (күн және жел энергетикасымен интеграция)

MATLAB/Simulink бағдарламасында жасалған модель негізінде күн мен жел энергетикасы көздеріне аккумуляторларды қосқанда келесі нәтижелер алынды:

– Аккумуляторларсыз жүйеде өндірілген энергияның 30–45 %-ы пайдаланылмай, желіге немесе тұтынушыға жетпей қалды (энергия шығыны жоғары).

– Литий-ионды аккумуляторлар қосылғанда артық энергияның 85–90 %-ы тиімді түрде жиналып, қажет кезде тұтынушыға берілді.

– Жүйе тиімділігі аккумулятор сыйымдылығы мен разряд/заряд жылдамдығына тікелей тәуелді болды.

Литий-ионды аккумуляторлар желілік және күн энергетикасындағы энергия тұрақсыздығын төмендетуге мүмкіндік береді. Дегенмен, энергия сақтау сыйымдылығы мен ұзақ мерзімді сенімділік - негізгі шектеуші факторлар.

Зерттеу нәтижелері көрсеткендей, литий-ионды аккумуляторлар жаңғыртылатын энергия көздерімен біріктірілген жүйелерде энергияны сенімді түрде сақтау мен қайта таратуға мүмкіндік береді. Алайда олардың тиімділігін арттыру үшін келесі бағыттарда жұмыстар қажет:

– Жаңа анод/катод материалдарын зерттеу және өндіріске енгізу;

– Температуралық төзімділікті жақсарту (әсіресе ыстық климатқа бейімделу үшін);

– Қауіпсіздік деңгейін арттыру (отқа төзімді электролиттер, қысым реттегіш жүйелер);

– Батареяны қайта өңдеу және экологиялық әсерін азайту.

Қорытынды

Бұл зерттеуде күн және жел энергетикасы жүйелерінде литий-ионды аккумуляторларды тиімді қолдану және олардың техникалық сипаттамаларын жетілдіру мәселелері қарастырылды. Жаңғыртылатын энергия көздерінің тұрақсыздығына байланысты энергияны тиімді әрі ұзақ мерзімді сақтау - қазіргі энергетика саласының өзекті мәселелерінің бірі. Литий-ионды аккумуляторлар бұл мәселенің негізгі шешімі ретінде кеңінен қолданылып келе жатқанымен, олардың қуаттылығы, термиялық тұрақтылығы және циклдық сенімділігі әлі де жетілдіруді қажет етеді [10].

Зерттеу нәтижелері көрсеткендей:

Анод және катод материалдарының таңдауы аккумулятордың энергия тығыздығы мен қызмет мерзіміне тікелей әсер етеді. Катодтар мен кремний анодтары жоғары энергия тығыздығын көрсетсе де, олардың ұзақ мерзімді

тұрақтылығы төмен. Ал LiFePO_4 комбинациясы тұрақтылық пен қауіпсіздік жағынан анағұрлым тиімді.

Температуралық тұрақтылық тұрғысынан қарағанда, LiFePO_4 катодтары және қатты электролиттер жоғары температурада қауіпсіз жұмыс істеуге бейім.

Моделдеу нәтижелері литий-ионды аккумуляторларды күн және жел энергетикасы жүйелеріне қосу арқылы энергияны сақтау тиімділігін 85–90%-ға дейін арттыруға болатынын көрсетті.

Энергия сақтау жүйелерінің жалпы тиімділігі аккумулятордың сыйымдылығы, заряд/разряд жылдамдығы және материал сапасына байланысты.

Осылайша, литий-ионды аккумуляторларды жетілдіру жаңғыртылатын энергия көздерін тиімді пайдалануға, энергия жүйелерінің сенімділігін арттыруға және экологиялық тұрғыдан таза энергетикалық инфрақұрылым қалыптастыруға жол ашады.

Пайдаланылған деректер тізімі

1 Назаров, А. Б. Жаңғыртылатын энергия көздеріндегі энергия сақтау жүйелері // Энергетика және ресурстар. – 2021. – № 3(45). – Б. 24–30.

2 Әбдігаппарова, Л. Ж., Төлеуова, Г. Н. Литий-ионды аккумуляторлар және олардың экологиялық аспектілері // ҚазҰУ хабаршысы. Химия сериясы. – 2022. – № 2(78). – Б. 58–65.

3 Goodenough, J. B., Kim, Y. Challenges for Rechargeable Li Batteries // Chemistry of Materials. – 2010. – Vol. 22, No. 3. – P. 587–603. – <https://doi.org/10.1021/cm901452z>

4 Madani, S.S., Schaltz, E., Knudsen Kær, S. Heat Loss Measurement of Lithium Titanate Oxide Batteries under Fast Charging Conditions by Employing Isothermal Calorimeter. – Batteries. – 2018. – № 4. – P. 597.

5 Шарафутдинов, Р. Р., Кадыров, Э. З. Аккумуляторлар: Жаңа буын материалдары және олардың энергетикадағы рөлі // Энергетика России. – 2020. – № 6. – С. 18–25.

6 BloombergNEF. Battery Price Survey 2023 // <https://about.bnef.com> – Қаралған күні: 01.10.2025.

7 Шыныбеков, Е. Ж. Қазақстандағы жаңартылатын энергия көздерін сақтау технологиялары // Энергетика және машина жасау. – 2023. – № 1. – Б. 10–17

8 International Renewable Energy Agency (IRENA). Innovation Outlook: Smart Charging for Electric Vehicles. – Abu Dhabi: IRENA, -2019. – 72 p.

9 Бастрон, А. В. Ветроэнергетика Красноярского края. – Красноярск : Красноярский гос. аграрный университет, 2015. – 252 с.

10 **Мартыанов, А. С.** Исследование алгоритмов управления и разработка контроллера ветроэнергетической установки с вертикальной осью вращения. Дисс.на соиск.уч.степ.канд.техн.наук. – Челябинск, 2016. – 174 с.

References

1 **Nazarov, A. B.** Jangyrtylatyn energia kozderindegi energia saqtau jüeleri [Energy storage systems in renewable energy sources] [Text] // Energetika jane resurstar. – 2021. – № 345. – P. 24–30.

2 **Abdigapparova, L. J., Toleuova, G. N.** Liti-iondy akumulatorlar jane olardyn ekologialyq aspektleri // [Lithium-ion batteries and their environmental aspects] [Text] // QazÜU habarşysy. Himia seriasy. – 2022. – № 278. – P. 58–65.

3 **Goodenough, J. B., Kim, Y.** Challenges for Rechargeable Li Batteries // Chemistry of Materials. – 2010. – Vol. 22. – No. 3. – P. 587–603. – <https://doi.org/10.1021/cm901452z>

4 **Madani, S. S., Schaltz, E., Knudsen Kær, S.** Heat Loss Measurement of Lithium Titanate Oxide Batteries under Fast Charging Conditions by Employing Isothermal Calorimeter. – Batteries. – 2018. – № 4. – P. 597.

5 **Şarafutdinov, R. R., Kadyrov, E. Z.** Akumulatorlar: Jana buyn materialdary jäne olardyn energetikadagy roli. [Batteries: new generation materials and their role in energy] [Text] // Energetika Rosii. – 2020. – № 6. – P. 18–25.

6 BloombergNEF. Battery Price Survey 2023. – <https://about.bnef.com> – (Date of review: 01.10.2025).

7 **Şynybekov, E. J.** Qazaqstandagy janartylatyn energia kozderin saqtau tehnologialary [Renewable energy storage technologies in Kazakhstan] [Text] // Energetika jane maşına jasau. – 2023. – №1. – P. 10–17.

8 International Renewable Energy Agency (IRENA). Innovation Outlook: Smart Charging for Electric Vehicles. – Abu Dhabi : IRENA, 2019. – 72 p.

9 **Bastron, A. V.** Vetroenergetika Krasnoïarskogo kraia [Wind power industry of the Krasnoïarsk Territory] [Text] Krasnoïarsk: Krasnoïarski gos. agrarnyi universitet. – 2015. – 252 p.

10 **Martyanov, A. S.** İssledovanie algoritmov upravleniia i razrabotka kontrolera vetroenergeticheskoi ustanovki s vertikalnoi osü vraşeniia. [Research of control algorithms and development of a controller for a wind turbine with a vertical axis of rotation.] [Text] Diss.na soisk.uch.step.kand.tehn.nauk. – Cheläbinsk, 2016. – 174 p.

08.10.25 ж. баспаға түсті.

13.11.25 ж. түзетулерімен түсті.

27.02.26 ж. басып шығаруға қабылданды.

**А. О. Жанпейісова¹, Е. А. Сарсенбаев², А. С. Тлешова³,
А. С. Әбілдаева⁴, А. А. Омарова⁵*

^{1,2}Қазақский национальный исследовательский технический университет имени К. И. Сатпаева,

Республика Казахстан, г. Алматы;

^{3,4}Таразский университет имени М. Х. Дулати,

Республика Казахстан, г. Тараз;

⁵Евразийский национальный университет имени Л. Н. Гумилева, Республика Казахстан, г. Астана.

Поступило в редакцию 08.10.25.

Поступило с исправлениями 13.11.25.

Принято в печать 27.02.26.

СПОСОБЫ ПОВЫШЕНИЯ ЭФФЕКТИВНОСТИ ЛИТИЙ-ИОННЫХ АККУМУЛЯТОРОВ В СОЛНЕЧНЫХ И ВЕТРОВЫХ ЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ СИСТЕМАХ

В настоящее время использование возобновляемых источников энергии является стратегическим направлением мирового энергетического переходного периода. В частности, поскольку сектор солнечной и ветроэнергетики подвержен нестабильности и сезонным колебаниям, проблема эффективного и долгосрочного хранения энергии носит актуальный характер. В этом смысле высокопроизводительные литий — ионные аккумуляторы широко рассматриваются как основное решение для накопления и стабилизации энергии.

В этой статье анализируются современные научно-технические подходы, направленные на повышение эффективности литий-ионных аккумуляторов. Основное внимание уделяется совершенствованию анодных и катодных материалов аккумуляторов, в частности замене кремния вместо графита и кобальтовых материалов экологически чистыми альтернативами. Также рассматриваются вопросы увеличения плотности энергии, обеспечения термической стабильности электролитов и увеличения продолжительности циклов заряда/разряда.

В статье также описываются особенности и технические ограничения интеграции литий-ионных аккумуляторов с возобновляемыми источниками энергии на конкретных примерах. Результаты исследования показывают, что совершенствование

аккумуляторных технологий позволит сформировать экологически безопасные системы хранения энергии, обеспечивая стабильную и надежную работу возобновляемой энергии.

Таким образом, литий-ионные аккумуляторы рассматриваются как неотъемлемый элемент будущей низкоуглеродной энергетической системы.

Ключевые слова: Литий-ионные батареи, возобновляемые источники энергии, солнечная энергия, ветроэнергетика, системы хранения энергии, анодные и катодные материалы.

*A. O. Zhanpeyisova¹, E. A. Sarsenbaev², A. S. Tlesnova³,

A. S. Abildqayeva⁴, A. A. Omarova⁵

^{1,2}Kazakh National Research Technical University named after K.I. Satbaeva, Republic of Kazakhstan, Almaty;

^{3,4}Taraz University named after. M. H. Dulati, Republic of Kazakhstan, Taraz;

⁵L. N. Gumilyov Eurasian National University, Republic of Kazakhstan, Astana.

Received 08.10.25.

Received in revised form 13.11.25.

Accepted for publication 27.02.26.

WAYS TO INCREASE THE EFFICIENCY OF LITHIUM-ION BATTERIES IN SOLAR AND WIND ENERGY SYSTEMS

Currently, the use of renewable energy sources is a strategic direction of the global energy transition period. In particular, since the solar and wind energy sector is subject to instability and seasonal fluctuations, the problem of efficient and long-term energy storage is urgent. In this sense, high—performance lithium-ion batteries are widely considered as the main solution for energy storage and stabilization.

This article analyzes modern scientific and technical approaches aimed at improving the efficiency of lithium-ion batteries. The main focus is on improving the anode and cathode materials of batteries, in particular, replacing silicon instead of graphite and cobalt materials with environmentally friendly alternatives. The issues of increasing energy density, ensuring the thermal stability of electrolytes and increasing the duration of charge/discharge cycles are also considered.

The article also describes the features and technical limitations of integrating lithium-ion batteries with renewable energy sources using specific examples. The results of the study show that the improvement of battery technologies will make it possible to form environmentally safe energy storage systems, ensuring stable and reliable operation of renewable energy.

Thus, lithium-ion batteries are considered as an integral element of the future low-carbon energy system.

Keywords: Lithium-ion batteries, renewable energy, solar energy, wind energy, energy storage systems, anode and cathode materials.

<https://doi.org/10.48081/BGQF1952>***Д. Д. Исабеков**

Торайғыров университеті,
Қазақстан Республикасы, Павлодар қ.

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-6673-5646>

*e-mail: Dauren_pvl2012@mail.ru

**ЭЛЕКТР ҚОНДЫРҒЫЛАРЫНЫҢ
АЛЬТЕРНАТИВТІК ҚОРҒАНЫСЫ**

Қымбат және металл көп қажет ететін ток трансформаторларын қолданудан бас тарту мәселесі CIGRE халықаралық комитеті тарапынан электрэнергетика саласы үшін стратегиялық міндет ретінде танылды. Алайда, дәстүрлі қорғаныс құралдарының барлығы дерлік ток трансформаторларынан ақпарат алады. Бұл ток трансформаторлары көп мөлшерде металды қажет етеді, ауыр және көлемді, жоғары бағамен өтпелі режимдерде айтарлықтай қателіктерге ие. Бұл мәселе микропроцессорлық қорғаныс жүйелерінің кең таралуымен күрделене түседі, бұл тәжірибе белгілі бір жағдайларда жеткілікті сенімділікке ие емес екенін көрсетті. Осыған байланысты дәстүрлі ток өлшеу трансформаторларын және осы трансформаторлардан қуат алатын байланысты қорғаныс жүйелерін пайдаланудан бас тартудың шұғыл қажеттілігі бар. Бұл мақалада ток трансформаторларын қолданбайтын терморезисторларға негізделген альтернативтік қорғаныс құрылғысын қарастыру ұсынылады. Бұл қорғаныс құрылғылары комплектік тарату құрылғысының (КТК) ұяшыққа қосылған электр қондырғылары үшін дәстүрлі ток қорғаныс құрылғыларына альтернативтік ретінде қолданылуы мүмкін. Ұсынылған қорғаныс құрылғысы әзірленген жаңа әдіс бойынша жасалған. Жұмыс нәтижелері ірі және шағын өнеркәсіптік кәсіпорындарда, электрстанцияларында және қосалқы станцияларда қолданылуы мүмкін, сондай-ақ ғылыми қауымдастық үшін қызығушылық тудырады, себебі олар электрэнергетикасындағы материалдарды, соның ішінде релелік қорғаныстағы материалдарды

үнемдеу мәселесін шешуге көмектеседі. Бұл жұмыстың мақсаты – комплектік құрылғыларының ұяшықта қосылған электр қондырғыларына арналған ток қорғанысын құру әдісін әзірлеу және ток трансформаторлары мен металл өзектері бар ток релелері бар дәстүрлі ток қорғаныстарына альтернативтік бола алатын қорғаныс құрылғысын жасау, бұл ретте қолданылатын материалдарды айтарлықтай үнемдеу.

Кілтті сөздер: терморезистор, қорғаныс, құрылғы, температура, шина, ресурстарды үнемдеу, ұяшық.

Кіріспе

Халықаралық үлкен электр жүйелері кеңесі (CIGRE) қымбат және металл көп қажет ететін ток трансформаторларынан бас тарту мәселесін, электр энергетика саласы үшін стратегиялық маңызды мәселе ретінде жариялады [1;2]. Іс жүзінде барлық дәстүрлі ток қорғаныс құрылғылары ток трансформаторларынан ақпарат алады. Сондықтан ауыр, үлкен және қымбат өлшеу ток трансформаторларына және оларға негізделген қорғаныс құрылғыларына альтернативаны табу қажет [3;4;5]. Металл өзектері бар, металл көп қажет ететін ток трансформаторларысыз қысқа тұйықталудан қорғайтын релелік құрылғыларды жасау жұмыстары өткен ғасырдың екінші жартысында басталған және бүгінгі күнге дейін өзекті болып қалуда [6;7;8]. Қазіргі уақытта микропроцессорлық релелік қорғаныс құрылғылары кеңінен қолданылады. Алайда, олар электромеханикалық немесе жартылай өткізгішті қорғаныс құрылғыларынан ондаған және жүздеген есе қымбат, ал интернет арқылы кибершабуылдарға осал болғандықтан, олардың сенімділігі жоғары емес. Сенімділікті арттыру үшін ток трансформаторларына және олар ақпарат алатын ток қорғаныс құрылғыларына альтернативаны табу қажет [9;10;11]. Өлшеу ток трансформаторларынсыз релелік қорғаныс құрылғыларын жобалаудың перспективалы әдістерінің бірі – басқа элементтерді, мысалы, басқа магниттік сезімтал элементтермен салыстырғанда бірқатар артықшылықтары бар терморезисторды қолдану болып табылады [12;13].

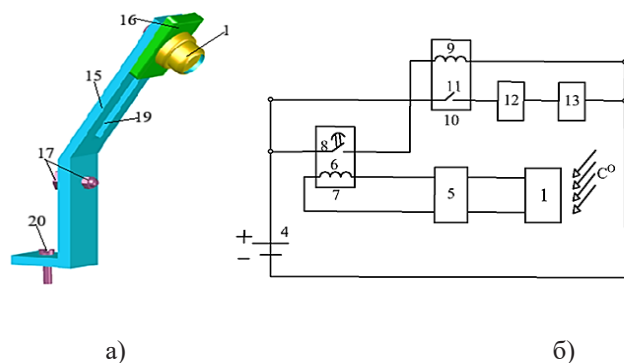
Материалдар мен әдістері

Кез келген ток қорғаныс, қорғалатын электр қондырғысының тогы белгіленген жұмыс тогынан асып кеткенде іске қосылады және электр қондырғыларындағы сыртқы немесе ішкі ақауларға әсер етеді. Жүргізілген зерттеулер нәтижесінде, мұндай ақауларды анықтаудың альтернативтік тәсілі дәстүрлі ток трансформаторларының орнына басқа элементтік базаны қолдану болып табылады. Осыған байланысты, жоғары вольтты электр қондырғылары үшін альтернативтік қорғаныс құрылғыларын енгізу

мүмкіндігін қарастыру қажет. Мұндай қорғаныстарда терморезистор сияқты элемент ток датчигі ретінде де, қорғаныс өлшеу құрылғысы ретінде де бір мезгілде әрекет етеді, электр қондырғысы жұмыс істеп тұрған кезде токты өткізетін шиналар шығаратын температураға әсер етеді. Бұл температураны қабылдау үшін мұндай элементтер токты өткізетін шиналарға жақын, ең аз рұқсат етілген қашықтықты сақтай отырып орнатылады [13].

Нәтижелер және талқылау

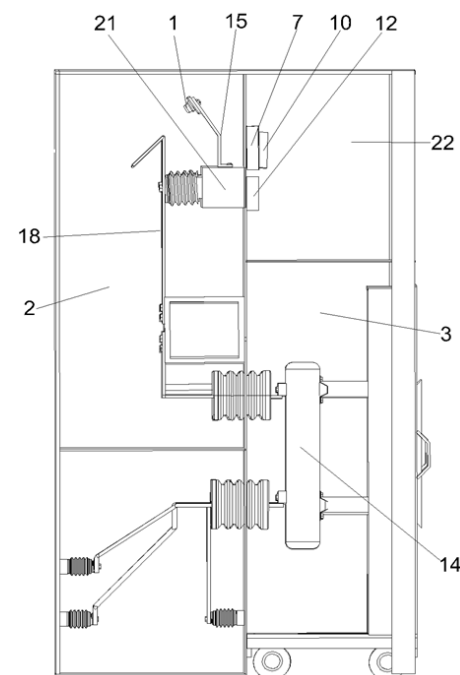
Ток қорғанысының негізгі элемент – терморезистор 1, кабельдік отсекте 2, комплектті тарату құрылғысының (КТҚ) 3 ұяшықтың ішінде орналасқан. Оның бірінші шығысы тұрақты оперативті ток 4 көзіне қосылған, ал екінші шығысы сигналды күшейткіштің 5 кірісіне қосылған (1,2 суреттер). Осы 5 күшейткіштің шығысына, орамасының 6 уақыт релесінің 7 бірінші шығысы қосылған, ал осы 7 реленің 6 орамасының екінші шығысы тұрақты ток көзінің 4 «минус» полюсіне қосылған. Тұрақты ток көзінің 4 «плюс» полюсіне қосылған 7 уақыт релесінің уақытты кешіктіріп тұйықталуға арналған 8 контактына 9 орамасының аралық реленің 10 бірінші шығысы қосылған. 10 реленің 9 орамасының екінші шығысы тұрақты оперативті ток көзінің 4 «минус» полюсіне қосылған. Тұрақты оперативті ток көзінің 4 «плюс» полюсіне қосылған 10 аралық реленің тұйықталуға арналған 11 контактына 12 көрсеткіш реленің кірісі қосылған, ал 12 реленің шығысына 13 ажырату катушкасының электр қондырғысының 14 ажыратқышының кірісі қосылған (16 сурет).



1-сурет – Альтернативтік қорғаныс құрылғысы: а) терморезистор; б) құрылғының структурлық схемасы

Терморезистор 1, 15 планкаға 16 пластина көмегімен 17 болт-гайкалы қосылысымен 18-ток өткізгіш шинаға қарама-қарсы, 19-тесіктер бойымен жылжу мүмкіндігімен бекітілген (1а, сурет). 15 планка 2 кабельдік отсекте 3 ұяшықта, 20-винттері мен 21-металл шығырына бекітіледі. 10-аралық және 7-уақыт реленің 6 және 9 орамдарының екінші ұштары 4-тұрақты оперативті ток көзінің «минус» полюсіне қосылған. 7-уақыт релесі, 10-аралық және 12-көрсеткіш релелер 3- ұяшықтың 22-релелік шкафта орналастырылған (2 сурет).

Құрылғы КТҚ 3 ұяшыққа қосылған электр қондырғыларының қысқа тұйықталудан қорғауын қамтамасыз етеді [12]. Қалыпты жұмыс режимінде, ұяшықтың 2 кабельдік бөлімінің 18 токты өткізетін шиналары арқылы қалыпты жұмыс мәнінен аспайтын ток ағады, сәйкесінше рұқсат етілген температурадан аспайды және терморезисторға 1 әсер ететін температура оның іске қосылуына жеткіліксіз болады, сондықтан ток қорғанысы іске қосылмайды (1а, 2 сурет).



2-сурет – КТҚ ұяшығының ішіндегі альтернативтік қорғаныс құрылғысының орналасуы

Қысқа тұйықталу пайда болған кезде, 2 кабельдік отсеке 18 ток өткізетін шиналардың температурасы өзгереді, рұқсат етілген мәннен жоғары көтеріледі және осы температураның өзгеруіне терморезистор 1 (16 сурет) әсер етеді. Ток өткізетін шиналардың 18 жоғары температурасының 1 терморезисторге әсері жебелермен көрсетілген. Содан кейін 1 терморезистордан сигнал 5 сигналды күшейткіштің кірісіне келіп түседі, ал одан күшейтілген сигнал 7 уақыт релесінің 6 орамасының бірінші шығысына беріледі. 7 Уақыт релесі 0,02 секундқа тең уақытты есептеп, уақытты бар 8 контактысын тұйықтай отырып, 10 аралық реленің 9 орамасының бірінші шығысына сигнал береді. Реле 10 қосылады және оның 11 тұйықтау контактысы арқылы, 12 көрсеткіш реленің көмегімен 14 ажыратқыштың 13 ажырату орамасының катушкасына сигнал береді. Осыдан кейін қорғалатын электр қондырғысы ажыратылады.

Қорытынды

Металл өзектері бар дәстүрлі ток трансформаторлары мен релелерді қолданбау, олардың жоғары құны мен салмақ-өлшемі параметрлері бар, бұл энергетика саласының өзекті мәселесіне – қолданылатын материалдарды үнемдеуге жауап береді, ал интернет қосылымына (Ethernet және Wi-Fi байланыс арналары) байланбау релелік қорғаудағы киберқауіпсіздік мәселесіне жауап береді, мысалы, кибершабуылдарға төзімділік, осылайша релелік қорғаудың осалдығын азайтады және ұсынылған құрылғының сыртқы және ішкі қондырғылардың комплектілік тарату құрылғысының ұяшыққа, қосылған электр қондырғыларын ток қорғауды жүзеге асыру үшін қолдануға мүмкіндік береді. Комплекс тарату құрылғысына қосылған электр қондырғыларына арналған қорғаныс құрылғыларын құру бойынша ұсыныстар келесідей болады. Ұяшықтар ішіндегі релелік қорғаныс элементтерін орнату орындары ток өткізгіш шиналардың температурасының максималды мәндері негізінде таңдалады. Зерттеулер дәстүрлі ток қорғау құрылғыларына альтернативтік бола алатын әртүрлі компоненттік негізінде қорғаныстың құру мүмкіндігін көрсетті.

Пайдаланылған деректер тізімі

- 1 **Дьяков, А. Ф.** Электроэнергетика мира в начале XXI столетия (по матер. 39-й сессии СИГРЭ, Париж) // Энергетика за рубежом. – 2004. – № 4. – С. 7–16.
- 2 **Казанский, В. Е.** Трансформаторы тока в схемах релейной защиты. – М. : Энергия, 1969. – 184 с.

- 3 Свердловский завод трансформаторов тока. – https://www.cztt.ru/catalog/transformatory-toka/transformatory-toka_naruzhnoy-ustanovki/opornye/10-kv-1/toll0iii/
- 4 **Андреев, В. А.** Релейная защита и автоматика систем электроснабжения: учебник для вузов. – Изд. 4-е, перер. и доп. – М. : Высшая школа, 2006. – 639 с.
- 5 **Шнеерсон, Э. М.** Цифровая релейная защита. – М. : Энергоатомиздат, 2007. – 549 с. – <https://www.elec.ru/library/nauchnaya-i-tehnicheskaya-literatura/cifrovaya-relejnaya-zashita/>
- 6 **Егизарян, Г. А., Стафеев, В. И.** Магнитодиоды, магнитотранзисторы и их применение. – М. : Радио и связь, 1987. – 88 с. – https://rusneb.ru/catalog/010003_000061_95d9b22e8ac5758361f9267d3_9c39f9d/
- 7 **Кобус, А., Тушинский, Я.** Датчики Холла и магниторезисторы / пер. с польск. В. И. Тихонова, К. Б. Макидонский; под ред. О. К. Хомерики. – М. : «Энергия», 1971. – 352 с.
- 8 **Gurevich, V. I.** Device of Protection of Relay Protection: Scientific Journal of «Electrical Engineering». – Vol. 3. – Iss. 3. – P. 52–57. – June 2013. – https://gurevich-publications.com/articles_pdf/device_protection_rel_prot_engl.pdf
- 9 **Kozhovich, L. A.** Non-conventional instrument transformers for improved substation design CIGRE Session, 2016. – <https://www.e-cigre.org/publications/detail/b3-101-2016-non-conventional-instrument-transformers-for-improved-substation-design.html>
- 10 **Crescentini, M. S., Syeda, F. and Gibiino, G. P.** Hall-effect current sensors: Principles of operation and implementation techniques. IEEE Sensors Journal. – Vol. 22. – № 11. – P. 10137–10151. – 1 June1, 2022. – <https://doi.org/10.1109/JSEN.2021.3119766>
- 11 **Issabekov, D. D.** Resource-saving protections of power transformers against internal faults, E3S Web of Conferences 434, 01041 ICECAE 2023. – P. 35–39. – 2023. – <https://doi.org/10.1051/e3sconf/202343401041>
- 12 Устройство комплектное распределительное напряжением 6÷10 кВ. КРУ К-63. Техническая информация / ООО Сибирский завод «Электрощит». – Новосибирск, 2015. – 20 с. – https://sibelz.ru/wp-content/uploads/2019/03/KRU_K-63_tehnicheskaya-informatsiya.pdf
- 13 Приказ Министра энергетики Республики Казахстан. Правила устройства электроустановок Республики Казахстан: утв. 20 марта 2015 года, №230. – adilet.zan.kz. – <https://adilet.zan.kz/rus/docs/V1500010851>

References

- 1 **D'yakov, A. F.** Elektroenergetika mira v nachale XXI stoletiya (po mater. 39-j sessii SIGRE, Parizh) [The global electric power industry at the beginning of the 21st century], [Text] // Energetika za rubezhom. – 2004. – №4. – P. 7–16.
- 2 **Kazanskij, V. E.** Transformatory toka v skemah relejnoj zashchity. [Current transformers in relay protection circuits], [Text] – Moscow : Energiya, 1969. – 184 p.
- 3 Sverdlovsk Current Transformer Plant. [Sverdlovsk Current Transformer Plant], [Text]. – <https://www.czt.ru/catalog/transformatory-toka/transformatory-toka-naruzhnoy-ustanovki/opornye/10-kv-1/tol10iii/>
- 4 **Andreev, V. A.** Relejnaya zashchita i avtomatika sistem elektrosnabzheniya: uchebnik dlya vuzov. [Relay protection and automation of power supply systems], [Text] – Izd. 4-e, perer. i dop. – Moscow : Vysshaya shkola, 2006. – 639 p.
- 5 **Egiazaryan, G. A., Stafeev, V. I.** Magnitodiody, magnitotranzistory i ih primeneniye. [Magnetodiodes, magnetotransistors and their application], [Text] – Moskva: Radio i svyaz', 1987. – 88 p. – https://rusneb.ru/catalog/010003_000061_95d9b22e8ac5758361f9267d3_9c39f9d/
- 6 **Kobus, A., Tushinskij, Ya.** Datchiki Holla i magnitorezistory / per. s pol'sk. V.I. Tihonova, K.B. Makidonskij; pod red. O.K. Homeriki. [Hall sensors and magnetoresistors], [Text]–Moscow : «Energiya», 1971. – 352 p.
- 7 **Shnerson, E. M.** Cifrovaya relejnaya zashchita.[Digital Relay Protection], [Text]– Moscow : Energoatomizdat, 2007.–549 p. – <https://www.elec.ru/library/nauchnaya-i-tehnicheskaya-literatura/cifrovaya-relejnaya-zashchita/>
- 8 **Gurevich, V. I.** Device of Protection of Relay Protection: Scientific Journal of «Electrical Engineering». – Vol. 3. – Iss. 3. – P. 52-57. – June, 2013. – https://gurevich-publications.com/articles_pdf/device_protection_rel_prot_engl.pdf
- 9 **Kozhovich, L. A.** Non-conventional instrument transformers for improved substation design CIGRE Session, 2016. – <https://www.e-cigre.org/publications/detail/b3-101-2016-non-conventional-instrument-transformers-for-improved-substation-design.html>
- 10 **Crescentini, M. S., Syeda, F. and Gibiino, G. P.** Hall-effect current sensors: Principles of operation and implementation techniques. IEEE Sensors Journal. – Vol. 22. – № 11. – P. 10137–10151. – 1 June, 2022. – <https://doi.org/10.1109/JSEN.2021.3119766>
- 11 **Issabekov, D. D.** Resource-saving protections of power transformers against internal faults, E3S Web of Conferences 434, 01041 ICECAE 2023. – P. 35–39. – 2023. – <https://doi.org/10.1051/e3sconf/202343401041>

- 12 **Ustroistvo komplektnoe raspredelitelnoe naprąjeniem 6÷10 kV. KRU K-63.** [Complete distribution device with voltage 6–10 kV. KRU K-63], [Text]–Novosibirsk: Tehnicheskaja informasia / OOO Sibirski zavod «Elektrořit», 2015.– 20 p. – https://sibelz.ru/wp-content/uploads/2019/03/KRU_K-63_tehnicheskaya_informatsiya.pdf
- 13 Order Prikaz Ministra jenergetiki Respubliki Kazahstan. Pravila ustrojstva jelektroustanovok Respubliki Kazahstan [Rules for Electrical Installations of the Republic of Kazakhstan], [Text]: utv. 20 marta 2015 goda, №230. – [adilet.zan.kz](https://adilet.zan.kz/rus/docs/V1500010851). – <https://adilet.zan.kz/rus/docs/V1500010851>

10.12.25 ж. баспаға түсті.

29.01.26 ж. түзетулерімен түсті.

27.02.26 ж. басып шығаруға қабылданды.

Д. Д. Исабеков

Торайғыров университет,

Республика Казахстан, г. Павлодар.

Поступило в редакцию 10.12.25.

Поступило с исправлениями 29.01.26.

Принято в печать 27.02.26.

АЛЬТЕРНАТИВНАЯ ЗАЩИТА ЭЛЕКТРОУСТАНОВОК

Проблема отказа от использования дорогостоящих и металлоемких трансформаторов тока была признана международным комитетом CIGRE стратегической задачей для электроэнергетической отрасли. Однако практически все традиционные средства защиты получают информацию от трансформаторов тока. Эти трансформаторы тока требуют большого количества металла, являются тяжелыми и громоздкими, имеют значительные погрешности в переходных режимах с высокой ценовой стоимостью. Эта проблема усугубляется все более широким распространением микропроцессорных систем защиты, которые, как показала практика, не обладают достаточной надежностью в определенных условиях. В связи с этим существует острая необходимость в отказе от использования традиционных измерительных трансформаторов тока и связанных с ними систем защит, которые питаются от этих трансформаторов. В данной статье предлагаются к рассмотрению альтернативное устройство защиты на основе термисторов, не использующие трансформаторы

тока. Эти устройства защиты могут быть использованы в качестве альтернативы традиционным устройствам защиты тока для электроустановок, подключенных к ячейке комплектного распределительного устройства (КРУ). Представленное устройство защиты изготовлено по разработанному новому методу. Результаты работы могут быть использованы на крупных и малых промышленных предприятиях, электростанциях и подстанциях, а также представляют интерес для научного сообщества, поскольку помогают решить актуальную для электроэнергетики проблему экономии используемых материалов, в том числе в релейной защите. Цель данной работы – разработать метод построения токовой защиты для электрических установок 10 кВ, подключенных к ячейкам распределительных устройств и создать устройство защиты, которые могут служить альтернативой традиционным токовым защитами с трансформаторами тока и токовыми реле с металлическими сердечниками, при этом значительно экономя используемые материалы.

Ключевые слова: терморезистор, защита, устройство, температура, шина, ресурсосбережение, ячейка.

**D. D. Issabekov*

*Toraighyrov University,
Republic of Kazakhstan, Pavlodar.*

Received 10.12.25.

Received in revised form 29.01.26.

Accepted for publication 27.02.26.

ALTERNATIVE PROTECTION OF ELECTRICAL INSTALLATIONS

The problem of abandoning the use of expensive and metal-intensive current transformers has been recognised by the international CIGRE committee as a strategic task for the electric power industry. However, virtually all traditional protection devices receive information from current transformers. These current transformers require a large amount of metal, are heavy and bulky, and have significant errors in transient modes with high cost. This problem is compounded by the increasing proliferation of microprocessor protection systems, which, as practice has shown, do not have sufficient reliability in certain conditions. In this regard, there

is an urgent need to abandon the use of traditional current measuring transformers and related protection systems that are powered by these transformers. This article proposes an alternative protection device based on thermistors that does not use current transformers. These protection devices can be used as an alternative to traditional current protection devices for electrical installations connected to a switchgear cell. The presented protection device is manufactured using a newly developed method. The results of the work can be used in large and small industrial enterprises, power plants and substations, and are also of interest to the scientific community, as they help to solve the problem of saving materials used in the electric power industry, including in relay protection. The aim of this work is to develop a method for constructing current protection for 10 kV electrical installations connected to switchgear cells and to create a protection device that can serve as an alternative to traditional current protection with current transformers and current relays with metal cores, while significantly saving on the materials used.

Keywords: thermistor, protection, device, temperature, bus, resource saving, cell.

<https://doi.org/10.48081/BGQF1953>

А. К. Кинжибекова¹, *Б. И. Досаев²

^{1,2}Торайғыров университет,

Республика Казахстан, г. Павлодар.

¹ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-5839-3001>

²ORCID: <https://orcid.org/0009-0005-0208-9912>

*e-mail: baltabek_dossaev@icloud.com

АНАЛИЗ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ ФЕРРОСПЛАВНОГО ГАЗА В КАЧЕСТВЕ ВТОРИЧНОГО ЭНЕРГОРЕСУРСА НА ПРЕДПРИЯТИИ

В статье рассматриваются пути повышения энергетической эффективности ферросплавного производства за счет использования теплового потенциала вторичных энергоресурсов (ВЭР). Проведен анализ образования и распределения ферросплавного газа, определена его роль как котельного топлива, рассчитан баланс тепловой энергии. Особое внимание уделено проблеме сжигания некондиционного ферросплавного газа на свечах, что приводит к потерям значительного объема потенциальной тепловой энергии и негативному воздействию на окружающую среду. В ходе исследования дана оценка достаточности ферросплавного газа для покрытия тепловых нагрузок при различных режимах работы предприятия и рассмотрены перспективы замещения внешних источников теплоснабжения за счет внутреннего энергетического потенциала. Дополнительно проанализированы существующие практики утилизации ВЭР, выявлены их ограничения и обозначены направления совершенствования технологий. Подчеркивается, что рациональное использование вторичных энергоресурсов способствует не только экономии топлива, но и сокращению выбросов парниковых газов, что особенно актуально в условиях ужесточения экологических требований. Полученные результаты подтверждают необходимость внедрения инновационных технических решений, ориентированных на комплексное использование ВЭР, что позволит существенно снизить

топливно-энергетические затраты и повысить экологическую безопасность производства.

Ключевые слова: ферросплавное производство, вторичные энергоресурсы, энергетическая эффективность, ферросплавный газ, тепловая энергия.

Введение

Современное промышленное производство характеризуется высокой энергоёмкостью и существенными потерями тепловой энергии. Наиболее остро проблема энергосбережения стоит в металлургии и, в частности, в ферросплавной промышленности, где до 30–40% потребляемых энергоресурсов теряется в виде вторичных энергоресурсов (ВЭР) [1, с. 326]. В условиях роста цен на топливо, ужесточения экологических требований и повышения конкуренции необходимость комплексного использования ВЭР становится стратегическим направлением развития предприятий.

Одним из ключевых ВЭР ферросплавного производства является ферросплавный газ, образующийся в процессе выплавки сплавов. Ферросплавный газ имеет высокую теплотворную способность, но используется неэффективно и сжигается на факелах, что приводит к потерям тепловой энергии и увеличению выбросов в атмосферу [2, с. 736].

Цель работы – выявление резервов повышения энергоэффективности за счёт утилизации теплового потенциала ВЭР.

Материалы и методы

В качестве исходных материалов использовались производственные данные за 2023–2024 годы, включая показатели по объёму образования ферросплавного газа, данные о его составе и теплотворной способности, сведения о работе котельных, а также архивные данные по отпуску тепловой энергии для нужд предприятия.

Ход работы включал систематизацию и обработку данных, составление топливно-энергетического баланса предприятия, построение упрощённых диаграмм распределения тепловых потоков и анализ сезонных колебаний образования и использования ферросплавного газа. Отдельное внимание уделялось оценке дефицита тепловой энергии в отопительный период и объёмов компенсации за счёт мазута.

В исследовании применялись следующие методы:

– балансовый метод – для определения соответствия между образованием ферросплавного газа и тепловой нагрузкой;

– теплотехнические расчёты – для перевода объёмов газа в энергетические показатели (ГДж, т у.т.);

– сравнительный анализ – для сопоставления данных по разным сезонам года;

– нормативные методики – в соответствии с РД 34.09.101-94 [3, с. 54] для оценки эффективности утилизации вторичных энергоресурсов;

– графо-аналитический метод – для построения диаграмм и таблиц, наглядно отражающих профицит и дефицит газа.

Таким образом, используемый комплекс методов позволил получить объективную оценку потенциала утилизации ферросплавного газа и выработать рекомендации по повышению энергетической эффективности производства.

Результаты и обсуждение

Ферросплавный газ образуется в процессе плавки ферросплавов и характеризуется высоким содержанием окиси углерода (до 64%). Низшая теплота сгорания газа составляет 7 620,8 кДж/м³, что делает его сопоставимым по энергетическому потенциалу с низкокалорийными промышленными газами [4, с. 215].

В таблице 1 представлены основные характеристики ферросплавного газа.

Таблица 1 – Основные характеристики ферросплавного газа

Показатель	Значение
Низшая теплота сгорания, кДж/м ³	7 620,8
CO, %	64
H ₂ , %	7
O ₂ , %	2
CO ₂ , %	18
N ₂ , %	6
CH ₄ , %	1
H ₂ O, %	2

Общий объём образования ферросплавного газа в 2024 году составил 599,9 млн м³. Из данного количества газа около 22% (132,4 млн м³) признано непригодным к использованию на котлах (некондиционным) и сожжено на свечах, что эквивалентно 686,6 тыс. кДж тепловой энергии [5, с. 178].

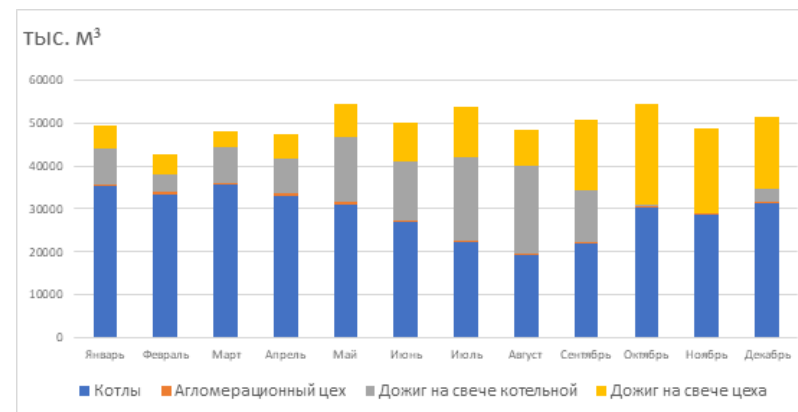


Рисунок 1 – Распределение ферросплавного газа в 2024 году

Анализ диаграммы показывает, что 58% ферросплавного газа используется на котлах, 19% – сжигается на свече котельной, 22% – непригодный для использования газ, менее 1% – используется в агломерационном цехе.

Таким образом, значительная часть (около 42%) энергетического потенциала остаётся невостребованной, что снижает эффективность производства и увеличивает углеродный след предприятия.

Система теплоснабжения завода включает два основных источника:

Районную отопительную котельную;

Газомазутную котельную, функционирующую преимущественно на ферросплавном газе.

Согласно архивным данным, общий отпуск тепловой энергии в 2024 году составил 1 105 тыс. Гкал, из которых 59% приходится на районную котельную и 41% – на газомазутную котельную.

Таблица 2 – Баланс тепловой энергии за 2024 г.

Источник	Выработка, Гкал	Доля, %
Районная отопительная котельная	654 037	59
Газомазутная котельная	451 448	41
Итого	1 105 485	100

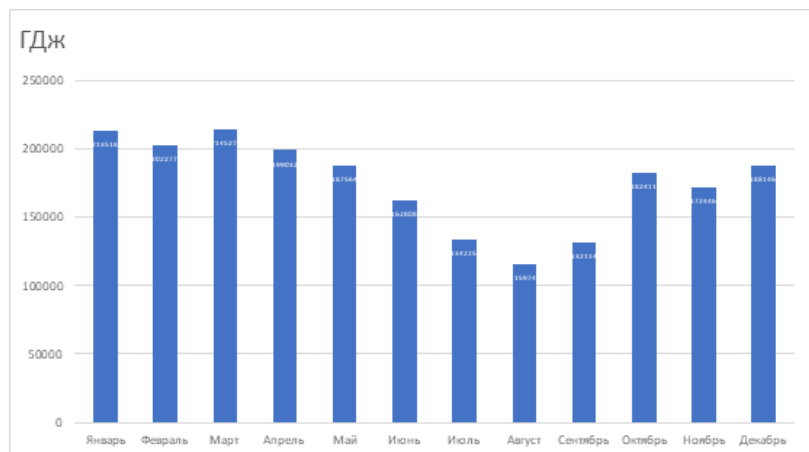


Рисунок 2 – Динамика отпуска тепловой энергии от районной отопительной и газомазутной котельных в течение года

Динамика отпуска тепловой энергии в течение года показывает сезонные колебания, с пиком в январе–марте и минимумом в июле–августе. Эти колебания создают дисбаланс между образованием и потреблением ферросплавного газа.

В исследовании рассмотрена возможность отключения районной отопительной котельной от системы теплоснабжения завода и перевод нагрузки на газомазутную котельную. В этом случае потребность в дополнительной выработке тепловой энергии составит около 123 тыс. Гкал/год [6, с. 15–97].

В таблице 3 представлен баланс ферросплавного газа и потребности мазута.

Таблица 3 – Баланс ферросплавного газа и потребности в мазуте

Период	Профицит/дефицит ферросплавного газа, тыс. м ³	Эквивалент мазута, тонн
Май–Сентябрь	+ 80 865	0
Октябрь–апрель	- 53 163	8 045

Расчёты показали, что в летний период (май–сентябрь) наблюдается профицит ферросплавного газа, достаточный для покрытия всех потребностей. Однако в отопительный сезон возникает дефицит – порядка

53 млн м³ в год. Для его компенсации требуется сжигание мазута в объёме до 8045 тонн в год [7, с. 205-214].

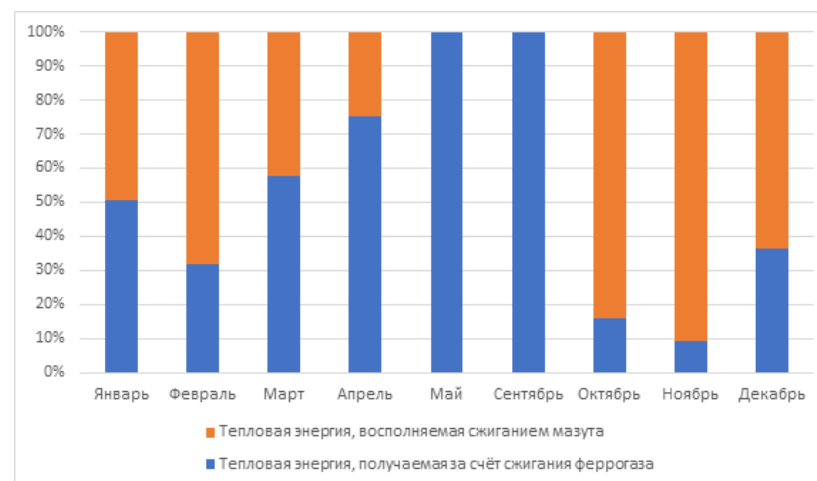


Рисунок 3 – Соотношение покрытия тепловой нагрузки ферросплавным газом и мазутом

Диаграмма на рисунке 3 показывает, что доля покрытия тепловой нагрузки ферросплавным газом в отопительный сезон составляет 44%, остальное компенсируется мазутом. Таким образом, несмотря на значительный вклад ферросплавного газа, остается необходимость использования дополнительного топлива для полного покрытия потребностей в тепле. Это определяет распределение нагрузки между различными потребителями тепловой энергии.

Значительную часть тепловой нагрузки формируют газоочистные установки, которые потребляют около 27,4 Гкал/ч (48 % суммарной нагрузки) [8, с. 392]. Дополнительными потребителями являются бойлеры горячего водоснабжения, подогреватели мазута и деаэраторы.

Результаты проведенного анализа показывают:

- потенциал энергосбережения заключается в более полном использовании ферросплавного газа;
- основное препятствие – несоответствие между временем образования избыточного газа (лето) и высокой тепловой нагрузкой (зима);

– решением может быть внедрение технологий аккумулирования энергии (например, теплоаккумуляторов) или конверсии тепла в электрическую энергию [9, с. 120–135];

– дополнительный резерв – модернизация котельного оборудования и газоочистных установок с целью повышения их КПД.

Перевод части нагрузки с мазута на утилизированный газ позволит снизить расходы и уменьшить углеродный след предприятия [10, с. 44–103].

Выводы

В статье представлен анализ теплового потенциала ферросплавного газа как вторичного энергоресурса. Показано, что ежегодно сжигается около 113,8 млн м³ газа на свечах, что эквивалентно 686,6 тыс. кВт неостребованной тепловой энергии. Использование этого ресурса позволило бы существенно сократить затраты предприятия на первичные энергоресурсы.

Однако для обеспечения круглогодичного использования необходимо внедрение технологий аккумулирования, модернизация котельного оборудования и оптимизация режимов работы газоочистки. Комплексная реализация указанных мер позволит повысить энергетическую эффективность производства и снизить негативное воздействие на окружающую среду.

Список использованных источников

- 1 Кутателадзе, С. С. Тепломассообмен. – М. : Энергия, 1990 – 326 с.
- 2 Ландау, Л. Д., Лифшиц, Е. М. Гидродинамика. – М. : Наука, 1986 – 736 с.
- 3 РД 34.09.101-94. Методические указания по определению эффективности утилизации ВЭР. – М., 1994 – 54 с.
- 4 Бегалиев, А. Б. Энергетическая эффективность промышленных предприятий Казахстана. – Алматы : КазНТУ, 2019 – 215 с.
- 5 Кинжибекова, А. К. Утилизация вторичных энергоресурсов на металлургических предприятиях. – Павлодар : Торайғыров университет, 2022 – 178 с.
- 6 International Energy Agency (IEA). Energy Efficiency in Industry. – Paris: IEA, 2022 – 15–97 p.
- 7 Zhang, Y., Wang, L. Waste Heat Recovery Technologies in Ferroalloy Production. // Energy Reports, 2021 – 205–214 p.
- 8 Smith, J. Industrial Energy Efficiency: Principles and Practice. – New York : Springer, 2020 – 392 p.
- 9 Lee, C. et al. Utilization of By-Product Gases in Metallurgical Plants. // Journal of Cleaner Production, 2020 – 120–135 p.

10 World Bank. Energy Efficiency in Central Asia Industry. – Washington: WB, 2021 – 44–103 p.

References

- 1 Kutateladze, S. S. Teplomassoobmen. – Moscow : Energiya, 1990. [Heat and mass transfer] – 326 p.
- 2 Landau, L. D., Lifshitz, E. M. Hidrodinamika. – Moscow : Nauka, 1986. [Hydrodynamics] – 736 p.
- 3 RD 34.09.101-94. Metodicheskie ukazaniya po opredeleniu effektivnosti utilizacii VER. – Moscow, 1994. [Guidelines for determining efficiency of secondary energy resources utilization] – 54 p.
- 4 Begaliev, A. B. Energeticheskaya effektivnost promyshlennyh predpriyatiy Kazakhstana. – Almaty, KazNTU, 2019. [Energy efficiency of industrial enterprises of Kazakhstan] – 215 p.
- 5 Kizhibekova, A. B. Utilizaciya vtorichnyh energoresursov na merallurgicheskikh predpriyatiyah. – Pavlodar: Toraihyrov universitet, 2022. [Utilization of secondary energy resources at metallurgical enterprises] – 178 p.
- 6 International Energy Agency (IEA). Energy Efficiency in Industry. – Paris: IEA, 2022 – 15–97 p.
- 7 Zhang, Y., Wang, L. Waste Heat Recovery Technologies in Ferroalloy Production. // Energy Reports, 2021 – 205–214 p.
- 8 Smith, J. Industrial Energy Efficiency: Principles and Practice. – New York : Springer, 2020 – 392 p.
- 9 Lee, C. et al. Utilization of By-Product Gases in Metallurgical Plants. // Journal of Cleaner Production, 2020 – 120–135 p.
- 10 World Bank. Energy Efficiency in Central Asia Industry. – Washington : WB, 2021 – 44–103 p.

Поступило в редакцию 30.09.25.

Поступило с исправлениями 12.11.25.

Принято в печать 27.02.26.

А. К. Кинжибекова¹, *Б. И. Досаев²

^{1,2}Торайғыров университеті,

Қазақстан Республикасы, Павлодар қ.

30.09.25 ж. баспаға түсті.

12.11.25 ж. түзетулерімен түсті.

27.02.26 ж. басып шығаруға қабылданды.

КӘСІПОРЫНДА ФЕРРОҚОРЫТПА ГАЗЫН ЕКІНШІЛІК ЭНЕРГИЯ РЕСУРСЫ РЕТІНДЕ ПАЙДАЛАНУДЫ ТАЛДАУ

Мақалада ферроқорытпа өндірісінің энергетикалық тиімділігін арттыру жолдары екіншілік энергия ресурстарының (ЕЭР) жылулық әлеуетін пайдалану есебінен қарастырылады. Ферроқорытпа газының түзілуі мен таралуына талдау жүргізіліп, оның қазандық отыны ретіндегі рөлі анықталды, жылу энергиясының балансы есептелді. Ерекше назар жарамсыз ферроқорытпа газын алауларда жағу мәселесіне аударылды, бұл едәуір көлемдегі әлеуетті жылу энергиясының жосалуына және қоршаған ортаға кері әсер етуіне алып келеді. Зерттеу барысында әртүрлі жұмыс режимдерінде кәсіпорынның жылу жүктемелерін жабуға ферроқорытпа газының жеткіліктілігі бағаланып, ішкі энергетикалық әлеует есебінен сыртқы жылумен жабдықтау көздерін алмастырудың болашағы қарастырылды. Қосымша түрде ЕЭР-ді кәдеге жарату бойынша қолданыстағы тәжірибелер талданып, олардың шектеулері анықталды және технологияларды жетілдіру бағыттары белгіленді. Екіншілік энергия ресурстарын ұтымды пайдалану тек отынды үнемдеуге ғана емес, сондай-ақ парниктік газдар шығарындыларын азайтуға ықпал ететіні атап өтіледі. Алынған нәтижелер ЕЭР-ді кешенді пайдалануға бағытталған инновациялық техникалық шешімдерді енгізудің қажеттілігін растайды, бұл өз кезегінде отын-энергетикалық шығындарды едәуір төмендетуге және өндірістің экологиялық қауіпсіздігін арттыруға мүмкіндік береді.

Кілтті сөздер: ферроқорытпа өндірісі, екіншілік энергия ресурстары, энергетикалық тиімділік, ферроқорытпа газы, жылу энергиясы.

A. Kinzhibekova¹, *B. Dossayev²

^{1,2}Toraighyrov university,
Republic of Kazakhstan, Pavlodar.

Received 30.09.25.

Received in revised form 12.11.25.

Accepted for publication 27.02.26.

ANALYSIS OF THE USE OF FERROALLOY GAS AS A SECONDARY ENERGY RESOURCE AT THE ENTERPRISE

The article examines ways to improve the energy efficiency of ferroalloy production through the utilization of the thermal potential of secondary energy resources (SER). An analysis of the formation and distribution of ferroalloy gas was carried out, its role as boiler fuel was determined, and the heat energy balance was calculated. Particular attention is paid to the problem of flaring off off-grade ferroalloy gas, which leads to the loss of a significant amount of potential thermal energy and has a negative impact on the environment. The study assesses the sufficiency of ferroalloy gas to cover heat loads under various operating modes of the enterprise and considers the prospects for replacing external heat supply sources through the internal energy potential. In addition, existing practices for SER utilization were analyzed, their limitations identified, and directions for technology improvement outlined. It is emphasized that the rational use of secondary energy resources contributes not only to fuel savings but also to the reduction of greenhouse gas emissions, which is especially relevant under stricter environmental regulations. The results obtained confirm the need for the implementation of innovative technical solutions aimed at the integrated use of SER, which will significantly reduce fuel and energy costs and enhance the environmental safety of production.

Keywords: ferroalloy production, secondary energy resources, energy efficiency, ferroalloy gas, thermal energy.

<https://doi.org/10.48081/BGQF1954>

Т. К. Койшиева¹, *З. Б. Бекжан², Г. Р. Балходжаева³

^{1,2}Казахский национальный университет имени аль-Фараби,

Республика Казахстан, г. Алматы;

³Кызылординский университет имени Коркыт Ата,

Республика Казахстан, г. Кызылорда.

¹ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-5320-6243>

²ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-6018-0945>

³ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-5066-1849>

*e-mail: zulfiya.bekzhan@gmail.com

ТЕХНОЛОГИЯ КОМПАНОВКИ И ОПТИМИЗАЦИИ ПОЛЕ ГЕЛИОСТАТОВ СОЛНЕЧНОЙ ЭЛЕКТРОСТАНЦИИ БАШЕННОГО ТИПА

В данной работе рассматриваются принципы проектирования и создания солнечной электростанции (СЭС) башенного типа на территории Республики Казахстан. Актуальность темы обусловлена необходимостью расширения использования возобновляемых источников энергии, в частности, солнечной энергии, с целью повышения энергетической независимости и экологической устойчивости страны. В Казахстане основное внимание уделяется развитию фотоэлектрических солнечных станций, однако мировой опыт демонстрирует эффективность и перспективность других типов солнечных электростанций, включая башенные солнечные тепловые станции. В рамках исследования реализована многофакторная математическая модель, позволяющая проводить оптимизацию параметров системы СЭС башенного типа. Особое внимание уделено разработке и применению моделей оптической части станции, включающих расчет отражающих поверхностей (гелиостатов) и концентрации солнечного излучения на центральном приёмнике. Разработанные модели реализованы в виде программных комплексов, обеспечивающих проведение инженерных расчётов на ЭВМ [1]. На основе полученных результатов сформулированы рекомендации для проектных и инженерных

организаций, занимающихся разработкой и внедрением солнечных электростанций башенного типа в климатических условиях Казахстана.

Результаты исследования позволяют дать конкретные рекомендации проектным и инженерным организациям по созданию башенных солнечных электростанций, эффективно работающих в климатических условиях Казахстана.

Ключевые слова: СЭС башенного типа, оптическая система СЭС, солнечный парогенератор, теплоприёмник, гелиостат.

Введение

Солнечная электростанция представляет собой - крупномасштабную энергетическую систему, она состоит из центрального приёмника (солнечный парогенератор) и собственного преобразователя (рис.1).

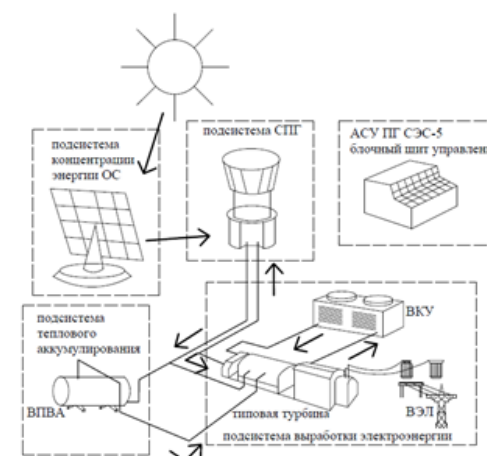


Рисунок 1 – Общая структурная схема солнечной электростанции башенного типа

Основные подсистемы СЭС:

- Подсистема солнечный парогенератор (СПГ) расположен на башне высотой 70м, в центре поле гелиостатов;
- Оптическая система (ОС) для концентрации солнечного излучения состоит из зеркальных гелиостатов с собственными системами управления;

– Подсистема паро-водяной тепловой аккумулятор (ПВТА) предназначена для накопления тепловой энергии (насыщенный пар), а также имеется подсистема воздушная коллекторная установка (ВКУ) [2].

Предполагаемый район строительства подобных станций, может быть в Туркестанской, Кызылординской, Атырауской и Жамбылской областей Казахстана. Эти регионы наиболее подходят по климатическим условиям.

На различных этапах проектирования подобных станции возникает ряд задач теоретического характера и поиск оптимальных конструктивных схем СЭС.

По такому методу разработаны большинство зарубежных проектов солнечных станций, интенсивно разрабатываемых специалистами США, Франции, Японии и других стран [3].

Материалы и методы

В методологическом плане задачей многофакторной модели оптической системы СЭС является выявление и визуализация основных характеристик станции.

Для его решения требуются глубокие теоретические проработки и создание специального класса многофакторных математических моделей, позволяющих проводить сравнительный анализ и отбор вариантов компоновки ОС СЭС.

Поэтому разработана многофакторная математическая модель ОС СЭС, реализованная в виде набора программ на ЭВМ.

Качественная характеристика этого метода является исследование широкоапертурных концентрирующих зеркальных систем с изменяемой геометрией.

Именно такая схема вычисления реализована в многофакторной математической модели работы оптической системы СЭС, структурная схема которой приведена на рисунке 2.

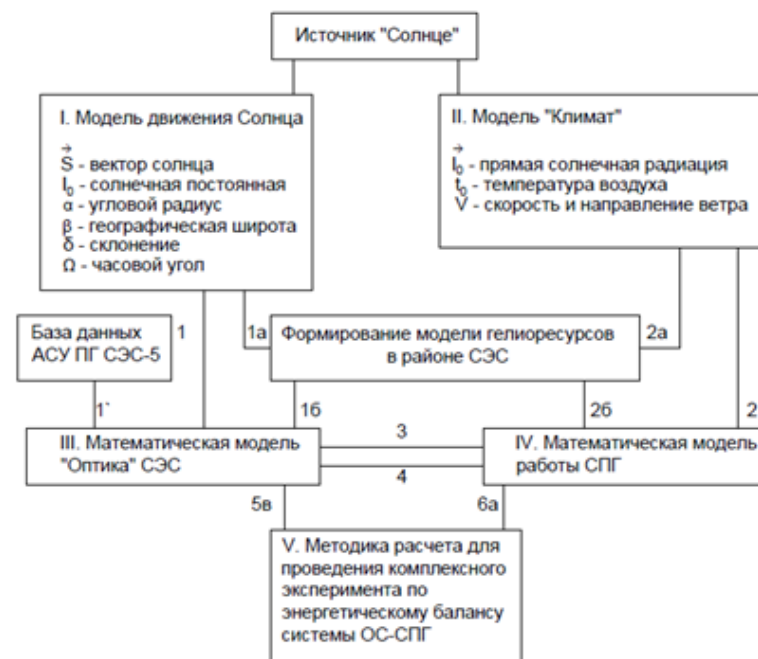


Рисунок 2 – Структура многофакторной математической модели ОС СЭС

Многофакторная математическая модель ОС СЭС состоит из нескольких подмоделей, два из них являются исходными моделями:

– Модель I – движение Солнца вводится с первичных данных солнечной энергии;

– Модель II – в климат вводится группа данных, который характеризует климатические условия района расположения СЭС.

Во внутренних блоках математической модели вычисляются положения солнца и наиболее вероятный уровень прямой солнечной радиации в различное время дня, в различные сезоны года.

Второй блок – эта группа данных содержит геометрические характеристики оптической системы: габаритные размеры зеркального поля и отдельных зеркал, расстояние между гелиостатами и способ их расположения в поле, высоту башни, размеры приемника и некоторые другие параметры, например, допуск на точность ориентации гелиостата.

Мы здесь используем программный модуль Shadow Analyzer для компьютерной визуализации полученных данных.

Функциональные возможности созданного программного модуля через программу Shadow Analyzer дает возможность оценить энергетические показатели станции, где учитываются климатические данные выбранного региона [4].

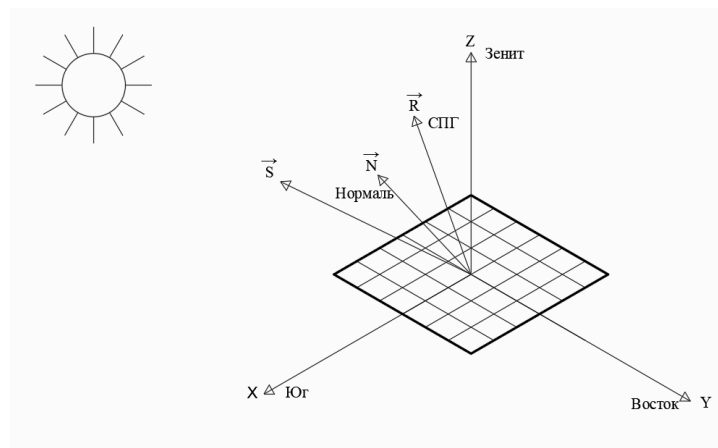


Рисунок 3 – Расчетная схема на плоскости i гелиостата:

– вектор Солнца, – вектор направлен на солнечный парогенератор (СПГ),
– вектор нормали.

Траектория движения Солнца в координатах азимута - высота над горизонтом на широте 44 с.ш. для различных месяцев описывается вектором, который в выбранной системе координат XYZ имеет следующие компоненты:

$$\begin{aligned} S_x &= -\sin \delta \cdot \cos \beta + \cos \delta \cdot \sin \beta \cdot \cos \Omega, \\ S_y &= -\cos \delta \cdot \sin \Omega, \\ S_z &= \sin \delta \cdot \sin \beta + \cos \delta \cdot \cos \beta \cdot \cos \Omega. \end{aligned} \quad (1)$$

Здесь приняты следующие обозначения:

β – географическая широта района планируемого расположения СЭС, для Кызылординской области $\beta = 44^\circ$ с.ш.;

δ – склонение Солнца, определяемое по формуле:

$$\sin \delta = \sin \delta_m \cdot \sin \left(2\pi \frac{n-81}{365} \right), \quad (2)$$

– наклон оси вращения Земли к плоскости эклиптики;

n – номер дня от начала календарного года;

Ω – часовой угол, определенный по формуле: $\Omega = \frac{\pi t}{12}$;

t – солнечное время в часах, отсчитываемое от астрономического полудня.

При статистической обработке данных актинометрических наблюдений прослеживается четкая связь между высотой Солнца над горизонтом h и уровнем прямой радиации при ясном небе I_o . Это связь хорошо описывается формулой В. Г. Кастрова.

$$I_o = \frac{I_n \cdot \sin h}{x + \sin h}, \quad (3)$$

В которую входят метеорологическая солнечная постоянная I_n и x коэффициент ослабления прямой солнечной радиации атмосферой, отнесенной к единичной оптической массе атмосферы.

Величина I_n относится к внеатмосферной плотности потока солнечной радиации на орбите Земли и характеризует ту часть спектра, которая не испытывает полного поглощения при прохождении атмосферы, и уровень которой у земной поверхности зависит от оптической длины луча в атмосфере.

В соответствии с изменением расстояния между Землей и Солнцем при движении Земли по эклиптической орбите величина I_n в течении года изменяется по закону:

$$I_n = \left[1.256 + 0.042 \cdot \cos \left(\frac{2\pi \cdot n}{365} \right) \right] \text{ кВт/м}^2 \quad (4)$$

где n – номер дня от начала года.

Коэффициент ослабления зависит от содержания водяных паров CO_2 и запыленности атмосферы. Оно изменяется по сезонам года и характеризуется своим среднемесячным значением $x = x(m)$, где m – номер месяца.

Значения для Кызылординского региона приведены в таблице 1.

Таблица 1 – Значение коэффициента ослабления прямой солнечной радиации для Кызылординского региона:

М	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
(m)	0.20	0.22	0.26	0.29	0.33	0.32	0.37	0.34	0.29	0.25	0.21	0.20

Дневной ход прямой радиации при ясном небе рассчитан в программной среде Shadow Analyzer по климатическим характеристикам Кызылординского региона, данные представлены на рисунке 3.

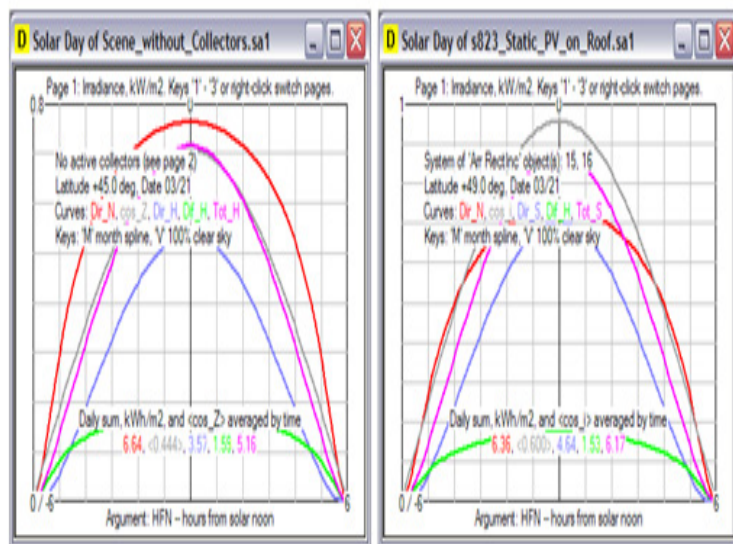


Рисунок 4 – Результаты расчета в программной среде Shadow Analyzer по климатическим характеристикам Кызылординской области

На рисунке 4 первая строка показывает объект СЭС, а вторая линия показывает географическую широту местности и дату.

Здесь показаны кривые:

- кривая Dir_N – прямая солнечная радиация на нормальной поверхности гелиостата;
- кривая $\cos(i)$ косинус угла падения солнечного луча;
- кривая Dif_H и Dir_S – полная диффузная и прямая солнечная радиация;
- кривая Tot_S суммарная солнечная радиация.

Разработанная расчетная математическая модель работы поле гелиостатов солнечной электростанции (рисунок 3), создана таким образом чтобы трансформация хода лучей в системе была так, что вектор нормали $\vec{N}_i$ к зеркалу непрерывно совпадал с биссектрисой плоского угла между гелиостатом – солнцем и гелиостатом – приемником [5].

Таким образом, ориентация гелиостата на поле однозначно определяется тремя векторами $\vec{S}_i$, $\vec{R}_i$, $\vec{N}_i$.

Теперь можно определить отношения этих векторов из геометрической схемы (рисунок 3).

Здесь используются свойства зеркального отражения и правила скалярного произведения единичных векторов для i -го гелиостата в данный момент времени. Это равно косинусу половины угла между векторами:

$$(\vec{S}_i, \vec{N}_i) = (\vec{N}_i, \vec{R}_i) = \cos \varphi_i \quad (5)$$

$$(\vec{S}_i, \vec{R}_i) = \cos 2\varphi_i \quad (6)$$

Здесь выражение косинуса двойного угла:

$$\cos \varphi_i = \left[\frac{(1 + \cos 2\varphi_i)}{2} \right]^{\frac{1}{2}} \quad (7)$$

Значения коэффициента косинуса $\cos \varphi$ это и есть коэффициент полезного действия η оптической системы солнечной СЭС.

Здесь, значок «9» соответствует – 0,9, значок «8» – 0,8 и т. д. Результаты показаны на рисунках 5а (22 марта, время: 12.00).

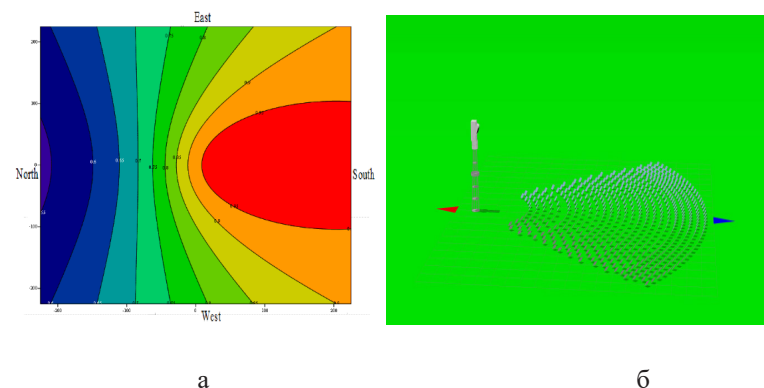


Рисунок 5 – Карты распределения уровня мгновенных локальных значений коэффициента эффективности использования зеркальной поверхности η гелиостатов

По результатам расчета значение коэффициента эффективности использования зеркальной поверхности гелиостатов η производилась компоновка зеркального поля в программной среде Shadow Analyzer рисунок 56 [6].

Результаты и обсуждения

В работе показана функциональная схема и подробное описание многофакторной математической модели оптической системы (ОС), для оценки энергетических характеристик станции [7].

Графики дневного изменения среднестатистического уровня прямой солнечной радиации при ясном небе для Кызылординского региона приведены на рисунке 4, они получены через программную среду Shadow Analyzer [8].

В результате математического моделирования режимов работы оптической системы солнечной электростанции получены карты распределения уровня мгновенных локальных значений коэффициента эффективности использования зеркальной поверхности η гелиостатов.

Из рисунка 5 видно, что распределение мгновенных локальных количественных и качественных значений меняется в течении рабочего дня в оптической системе, в зависимости от положения солнца в небосклоне.

Например в полдень (рисунок 5) значение достигается до 0.9, для тех гелиостатов которые расположены [9] на северной стороне от башни. Это означает что гелиостаты расположенные на северной стороне от башни работают более эффективно по сравнению с другими секторами.

Выводы

В работе представлены вопросы создания солнечных электростанций башенного типа и многофакторная математическая модель ОС СЭС.

Визуализация уровня солнечной радиации и режимы работы ОС производилось в программной среде ShadowAnalyzer [10].

В работе представлены основные подсистемы СЭС и функциональные схемы многофакторной математической модели ОС СЭС.

Многофакторная математическая модель дает возможность оценить энергетические показатели станции, которое выражает среднее значение по сезонному циклу работы СЭС.

В программный модуль Shadow Analyzer вводятся климатические характеристики Кызылординского региона и их алгоритмы расчета.

В работе также рассматриваются вопросы оптимизации и компьютерное моделирование режимов работы оптических систем в методологическом плане, задачей оптической системы поля гелиостатов является выявление, визуализация и оценка количественных, качественных характеристик,

которое определяет режимы работы оптической системы солнечных электростанций башенного типа.

Разработанная расчетная схема и алгоритмы расчета работы поле гелиостатов солнечной электростанции созданы таким образом, чтобы ход лучей в системе всегда был так, что вектор нормали совпадал с биссектрисой плоского угла между гелиостатом – солнцем и гелиостатом – приемником [11].

Визуальная карта показывает что распределение мгновенных локальных значений меняется в течении рабочего дня, в зависимости от положения солнца в небосклоне.

В полдень солнечные лучи падают более вертикально и прямо на зеркальную поверхность гелиостатов [12].

Результаты представлены в виде визуальной карты для локальных значений коэффициента эффективности использования зеркальной поверхности поле гелиостатов для различных моментов времени работ оптической системы.

По результатам расчета делаем вывод, что при проектировании оптических систем солнечных электростанций, надо более плотно разместить гелиостаты на северной стороне от башни, таким образом гелиостаты расположенные [13] на северной стороне от башни будут работать более эффективно по сравнению с другими секторами расположения.

Список использованных источников

1 Treinies, N. Hat der Energiesatellit eine Chance? Umschau in Wissenschaft und Technik. – 1975. – № 75(21). – P. 661–664.

2 Blake, F. A., Walton, J. D. Update on the solar power system and component research programme. «Solar Energy». – 1975. – № 17(4). – P. 213–219. – Sci-Hub [https://doi.org/10.1016/0038-092x\(75\)90002-x](https://doi.org/10.1016/0038-092x(75)90002-x)

3 Sharma, V., Nayak, J. K., Kedare, S. B. Effects of shading and blocking in linear Fresnel reflector field // Solar Energy. – 2015. – Vol. 113. – P. 114–138. – <https://dx.doi.org/10.1016/j.solener.2014.12.026>

4 Avezova, N. R., Khaitmukhamedov, A. E., Usmanov, A. Yu., Boliyev B. B. Solar Thermal Power Plants in the World: The Experience of Development and Operation // Applied Solar Energy. – 2017. – Vol. 53. – № 1. – P. 72–77. – <https://doi.org/10.3103/S0003701X17010030>

5 Cocco, D., Cau, G. Energy and economic analysis of concentrating solar power plants based on parabolic trough and linear Fresnel collectors // Proc IMechE Part A: // Journal of. Power and Energy. – 2015. – P. 1– 12. – <https://doi.org/10.1177/0957650915587433>

6 **Beltagy, H., Semmar, D., Lehaut, Ch., Said, N.** Theoretical and experimental per-formance analysis of a Fresnel type solar concentrator // Renewable Energy. – 2017. – Vol.101. – P. 782–793. – <https://doi.org/10.1016/j.renene.2016.09.038> Theoretical and experimental performance analysis of a Fresnel type solar concentrator

7 **Banos, R., Manzano-Agugliaro, F., Montoya, F.G., Gil, C., Alcayde, A., Gomez, J.** Optimization methods applied to renewable and sustainable energy: A review // Renewable and Sustainable Energy Reviews. 2011. – Vol.15. – P. 1753–1766. – <https://doi.org/10.1016/j.rser.2010.12.008>

8 **Payzullakhanov, M. S., Payziyev, Sh. D., Suleymanov, S. Kh.** «Modeling of Processes of Heating and Cooling of Materials in a Solar Furnace», Applied Solar Energy. – Vol. 55. – № 6. – P. 404–408. – 2019. – <https://doi.org/0.3103/S0003701X19060082> Sci-Hub || [10.3103/s0003701x19060082](https://doi.org/10.3103/s0003701x19060082)

9 **Koishiyev, T. K., Bekzhan, Z. B., Saribayev, A. S.** Optimization Issues, Computer Modeling, and Visualization of the Efficiency Coefficient of Optical Systems of Solar Furnaces and Solar Power Plants Applied Solar Energy. – 2023. – № 59(3). – P. 324–328. – <https://doi.org/10.3103/S0003701X2260148X>

10 **Koishiyev, T. K., Bekzhan, Z. B.** Creation of a computer architecture and evaluation of energy indicators of a PV-solar station in the «Shadow Analyzer» software environment Problems of energy and sources saving, Tashkent, Uzbekistan, 2022 qWyVQsL5HGBaoMNg4Sy5TYdLimX8pDHW00QF6W0I.pdf

11 **Boito, P., Grena, R.** Optimization of the geometry of Fresnel linear collectors // Solar Energy. – 2016. – Vol. 135. – P. 479–486. – <https://doi.org/10.1016/j.solener.2016.05.060>

12 **Strebkov, D. S., Penjiyev, A. M.** «Solar Power Plants with Parabolic Trough Concentrators in the Desert Area of Karakum», Applied Solar Energy, Vol. 55. – № 3. – P. 195–206, 2019. – <https://doi.org/10.3103/S0003701X19030083>

13 **Pinkey, M., Kumari, M., Sahdev, R.K., Tiwari, S.** «A Review on Solar Photovoltaic System Efficiency Improving Technologies», Applied Solar Energy, Vol. 58. – № 1. – P. 54–75. – 2022. – <https://doi.org/10.3103/S0003701X22010108>

Поступило в редакцию 03.10.25.

Поступило с исправлениями 10.11.25.

Принято в печать 27.02.26.

Т. Қ. Қойшиев¹, *З. Б. Бекжан², Г. Р. Балходжаева³

^{1,2}Әл-Фараби атындағы Қазақ ұлттық университеті,
Қазақстан Республикасы, Алматы қ.

³Қорқыт Ата атындағы Қызылорда университеті,
Қазақстан Республикасы, Қызылорда қ.

03.10.25 ж. баспаға түсті.

10.11.25 ж. түзетулерімен түсті.

27.02.26 ж. басып шығаруға қабылданды.

МҰНАРАЛЫ КҮН ЭЛЕКТР СТАНЦИЯСЫНЫҢ ГЕЛИОСТАТТАР ӨРІСІН ЖОБАЛАУ ЖӘНЕ ОҢТАЙЛАНДЫРУ ТЕХНОЛОГИЯСЫ

Осы жұмыста Қазақстан Республикасының аумағында мұнаралық типтегі күн электр станциясын (КЭС) жобалау және құру қағидаттары қарастырылады. Тақырыптың өзектілігі жаңартылатын энергия көздерін, әсіресе күн энергиясын кеңінен пайдаланудың қажеттілігімен, елдің энергетикалық тәуелсіздігі мен экологиялық тұрақтылығын арттыру мақсатымен негізделеді. Қазақстанда негізінен фотоэлектрлік күн станцияларын дамытуға басымдық беріліп отыр, алайда әлемдік тәжірибе күн электр станцияларының басқа да түрлерінің, соның ішінде мұнаралық күн жылу станцияларының тиімділігі мен болашағы зор екенін көрсетеді. Зерттеу аясында мұнаралық типтегі СЭС жүйесінің параметрлерін оңтайландыруға мүмкіндік беретін көпфакторлы математикалық модель жасалды. Жұмыста станцияның оптикалық бөлігіне – шағылдырғыш беттерді (гелиостаттарды) және күн сәулесін орталық қабылдағышқа шоғырландыру есептерін қамтитын модельдерді әзірлеуге және қолдануға ерекше көңіл бөлінді. Дайындалған модельдер инженерлік есептеулерді ЭЕМ көмегімен жүргізуге мүмкіндік беретін бағдарламалық кешендер түрінде іске асырылды [2,3]. Зерттеу нәтижелері Қазақстанның климаттық жағдайында мұнаралық типтегі күн электр станцияларын әзірлеу және енгізумен айналысатын жобалау және инженерлік ұйымдарға арналған ұсыныстарды қалыптастыруға негіз болды. Зерттеу нәтижелері Қазақстанның климаттық жағдайында тиімді жұмыс істейтін мұнаралық күн электр станцияларын құру бойынша жобалау және инженерлік ұйымдарға нақты ұсыныстар беруге мүмкіндік береді.

Кілтті сөздер: мұнара түріндегі КЭС, КЭС оптикалық жүйесі, күн бу генераторы, жылу қабылдағыш, гелиостат.

T. K. Koishiyev¹, *Z. B. Bekzhan², G. R. Balkodzhaeva³

^{1,2}Al-Farabi Kazakh National University,
Republic of Kazakhstan, Almaty;

³Korkyt Ata Kyzylorda University,
Republic of Kazakhstan, Kyzylorda.

Received 03.10.25.

Received in revised form 10.11.25.

Accepted for publication 27.02.26.

HELIOSTAT FIELD LAYOUT AND OPTIMIZATION TECHNOLOGY FOR A TOWER SOLAR POWER PLANT

This study examines the principles of designing and constructing a tower-type solar power plant (SPP) in the Republic of Kazakhstan. The relevance of the topic is justified by the need to expand the use of renewable energy sources, particularly solar energy, in order to increase the country's energy independence and environmental sustainability. In Kazakhstan, priority is mainly given to the development of photovoltaic solar stations; however, international experience shows the efficiency and promising potential of other types of solar power plants, including tower-based solar thermal power stations. As part of the research, a multifactor mathematical model was developed to optimize the parameters of a tower-type SPP system. Special attention was paid to the development and application of models for the optical part of the station, including the calculation of reflective surfaces (heliostats) and the concentration of solar radiation on the central receiver. The developed models have been implemented as software packages that enable engineering calculations using computers [2,3]. Based on the results obtained, recommendations were formulated for design and engineering organizations involved in the development and implementation of tower-type solar power plants under the climatic conditions of Kazakhstan.

The research results make it possible to provide specific recommendations to design and engineering organizations for the construction of tower-type solar power plants that operate efficiently under the climatic conditions of Kazakhstan.

Keywords: tower-type SES, SES optical system, solar steam generator, heat sink, heliostat.

МРНТИ 44.29.33

<https://doi.org/10.48081/BGQF1955>

**А. С. Куатова¹, А. Д. Мехмиев², Г. С. Нургаманбетова³,
Б. А. Байниязов⁴, А. Ш. Шукуралиев⁵**

^{1,3,4}Казахский агротехнический исследовательский
университет имени С. Сейфуллина,

Республика Казахстан г. Астана;

²Карагандинский технический университет имени Абылкаса Сагинова,
Республика Казахстан, г. Караганда;

⁵Андижанский государственный технический институт,
Республика Узбекистан, г. Андижан

¹ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-8972-1346>

²ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-2633-3976>

³ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-9529-2477>

⁴ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-1103-2329>

⁵ORCID: <https://orcid.org/0008-0007-7589-006>

*e-mail: anarkuatova2019@dmil.com

РАЗРАБОТКА ГИБРИДНОЙ ВЕТРО-СОЛНЕЧНОЙ ЭЛЕКТРОСТАНЦИИ С ГРАВИТАЦИОННЫМ НАКОПИТЕЛЕМ ЭНЕРГИИ

В статье рассматривается разработка гибридной ветро-солнечной электростанции с линией постоянного тока и гравитационным накопителем энергии, предназначенной для автономных децентрализованных энергосистем. Предлагаемая конструкция направлена на повышение эффективности использования возобновляемых источников энергии за счёт снижения потерь при передаче и обеспечения энергетического баланса в условиях переменной генерации. В исследовании учитываются климатические и погодные особенности Центрального Казахстана, характеризующегося высоким потенциалом солнечной и ветровой энергии при выраженной сезонной неравномерности выработки. Методология основана на системном инженерном подходе, включающем анализ метеорологических данных, оценку существующих технических решений и сравнение архитектур автономных энергосистем.

Показано, что комбинирование солнечных панелей и маломощных ветротурбин позволяет компенсировать сезонные колебания генерации и повысить надёжность электроснабжения. Рассмотрены перспективы применения гравитационного накопителя энергии как долговечного и экономически эффективного решения для удалённых и труднодоступных районов.

Ключевые слова: гибридная энергетическая установка, линия постоянного тока, гравитационный накопитель энергии, ветро-солнечная электростанция, автономная энергосистема.

Введение

Казахстан обладает высоким потенциалом в области возобновляемой энергетики благодаря благоприятным климатическим и географическим условиям. В ряде регионов средняя скорость ветра достигает 6–8 м/с, а уровень солнечной радиации обеспечивает годовую инсоляцию 1280–1870 кВт·ч/м² и до 3000 солнечных часов в год, что делает возможным эффективное использование ветровой и солнечной энергии.

Тем не менее, развитие ВИЭ, особенно в децентрализованных и автономных энергосистемах, сдерживается сезонной нестабильностью генерации, потерями при передаче энергии и отсутствием надёжных систем накопления. Это требует внедрения гибридных решений, объединяющих различные источники и современные технологии хранения энергии.

Гибридные ветро-солнечные электростанции с линией постоянного тока и гравитационным накопителем представляют собой перспективную модель для автономного энергоснабжения. Такие системы обеспечивают сглаживание колебаний генерации, повышение надёжности и снижение потерь. Их применение особенно актуально для Центрального Казахстана, где выраженные климатические контрасты требуют устойчивых технических решений.

Цель данной работы – разработка инженерной концепции гибридной ветро-солнечной электростанции с линией постоянного тока и гравитационным накопителем, адаптированной к условиям Центрального Казахстана, с акцентом на повышение надёжности и эффективности автономных систем. В связи с этим в работе используются методы системного анализа и сравнительного исследования архитектур автономных энергосистем

Материалы и методы

В работе использован системный инженерный подход к разработке гибридной ветро-солнечной электростанции с линией постоянного тока и гравитационным накопителем энергии. Основой послужил анализ климатических

и энергетических условий Центрального Казахстана, включающий обработку метеорологических данных по ветру и солнечной радиации.

Разработка конструктивных и технических решений базировалась на теоретическом обосновании и сравнительном анализе существующих технологий, а также учете специфики эксплуатации автономных энергосистем в условиях региона.

Особое внимание уделено выбору оптимальных технических решений, обеспечивающих снижение потерь энергии и повышение эффективности работы системы в рамках децентрализованного энергоснабжения. Применение указанных методов позволило получить результаты, представленные и проанализированные в следующем разделе.

Результаты и обсуждение

При проектировании гибридных энергетических установок с ВИЭ ключевым является учёт климатических условий региона. Эффективность солнечных панелей и ветрогенераторов зависит от инсоляции, ветровой активности, сезонных колебаний и экстремальных температур континентального климата.

Центральный Казахстан характеризуется резкими климатическими контрастами: жарким сухим летом и суровой зимой с большими перепадами температур. Это требует учёта как максимального генерационного потенциала, так и устойчивости систем к сезонной неравномерности.

Солнечный потенциал региона высок: среднегодовая инсоляция – 1500–1850 кВт·ч/м², солнечные часы – 2500–3000 в год. Ветровой потенциал позволяет использовать маломощные ветротурбины: среднегодовая скорость ветра – 4–6 м/с, что соответствует условиям эксплуатации ветрогенераторов класса III.

Для эффективного проектирования гибридных ветро-солнечных электростанций в Центральном Казахстане важно учитывать климатические и энергетические особенности региона. Здесь сочетаются факторы, влияющие на солнечную радиацию и ветровую активность. Из-за удалённости населённых пунктов и сезонной изменчивости погоды оценка этих параметров ключевая для выбора оптимальной системы.

Среднегодовая солнечная инсоляция составляет 1400–1700 кВт·ч/м², а количество солнечных часов – 2200–2700 в год, с максимумом летом. Среднегодовая скорость ветра на 10 м – 3,0–5,5 м/с, на 50 м – до 6–7 м/с, что подходит для маломощных ветроустановок [1]. В таблице 1 приведены обобщенные климатические характеристики по ключевым точкам Центрального Казахстана.

Таблица 1 – Климатические характеристики по ключевым точкам Центрального Казахстана

Регион	Среднегодовая инсоляция (кВт·ч/м²)	Солнечные часы (ч/год)	Среднегодовая скорость ветра (м/с) 10 м	Среднегодовая скорость ветра (м/с) 50 м
Астана	1600	2500	4,2	6,1
Караганда	1500	2300	3,8	5,8
Темиртау	1450	2200	3,5	5,5

Анализ климата Центрального Казахстана показывает высокий потенциал для ветро- и солнечной энергетики. Среднегодовая инсоляция составляет 1400–1700 кВт·ч/м², солнечные часы – 2200–2700, что обеспечивает эффективную работу фотоэлектрических систем. Ветровой потенциал с скоростью от 3,0–5,5 м/с (10 м) до 7 м/с (50 м) подходит для маломощных ветроустановок, важный для гибридных систем [2]. Различия между Астаной, Карагандой и Темиртау требуют учёта локальных условий при проектировании. Данные подтверждают возможность интеграции ветро-солнечных гибридов с постоянным током и гравитационными аккумуляторами для устойчивого энергоснабжения региона.

В энергетической системе Казахстана в 2023 году объём генерации из возобновляемых источников достиг примерно 6,675 млрд кВт·ч, что составило около 5,92 % от общей выработки [3]. Установленная мощность RES-объектов составила около 2 903,5 МВт, из которых ветровые электростанции – около 1 409,55 МВт, солнечные – около 1 222,61 МВт [4]. Эти данные подтверждают значимый вклад ветро- и солнечной генерации в национальную энергетику и создают основу для развития гибридных систем.

Гибридные конфигурации, объединяющие солнечные панели и ветротурбины, позволяют сгладить сезонные колебания выработки: в летние месяцы, когда преобладает солнечная энергия, ветровая активность снижается, а в осенне-зимний период ситуация меняется — основную нагрузку берет на себя ветер. Такое сочетание обеспечивает более стабильное и сбалансированное энергоснабжение с меньшими рисками перебоев.

На основе статистических данных можно смоделировать систему с солнечной генерацией мощностью 1,5 МВт и ветрогенератором на 2,0 МВт. При усреднённых коэффициентах загрузки среднесуточная выработка может составить около 22 МВт·ч, что соответствует годовому объёму примерно 8 030 МВт·ч. Если потребность местного сообщества – 10 МВт·ч в сутки (3 650 МВт·ч в год), такая гибридная система способна покрыть её с резервом около 20 %.

Комбинированное использование ветровой и солнечной энергии не только обеспечивает покрытие среднесуточных и годовых нагрузок, но и создает резерв мощности, снижая зависимость от традиционных источников. Это особенно важно для децентрализованных систем в удалённых регионах, где стабильность и надёжность энергоснабжения имеют первостепенное значение.

Выбор линии постоянного тока в маломощных автономных или децентрализованных системах обусловлен тем, что при значительной доле нагрузок на постоянном токе, а также наличии накопителей энергии постоянного тока и солнечных модулей, потери в линии постоянного тока могут быть существенно ниже. Такой подход упрощает топологию системы, уменьшает количество преобразователей, снижая затраты на обслуживание и повышая надёжность.

Сравнительное исследование микросетей переменного тока, постоянного тока и гибридных систем переменного-постоянного тока показало, что при малой доле нагрузок на постоянном токе потери в сети постоянного тока выше, однако при достижении примерно 50 % нагрузок на постоянном токе сеть постоянного тока становится эффективнее и демонстрирует меньшие потери. [5].

В исследовании распределительных сетей низкого и среднего напряжения с учётом реактивной мощности, возобновляемых источников энергии и аккумуляторов показано, что сеть постоянного тока сохраняет стабильные потери при изменении реактивной нагрузки, тогда как в сети переменного тока потери значительно возрастают. В испытаниях сеть постоянного тока снижала потери энергии на 30–60 % по сравнению с сетью переменного тока, особенно при высокой доле возобновляемых источников энергии и локальной аккумуляции. [6].

Гравитационный накопитель энергии накапливает энергию подъёмом тяжёлых масс или жидкости и преобразует её в электричество при опускании. Его преимущества – долговечность, низкое обслуживание, экологичность и меньшая деградация по сравнению с химическими аккумуляторами [7].

В реальной практике есть несколько пилотных и коммерческих примеров. Например: система Energy Vault, которая использует башни с бетонными блоками; Gravitricity в Великобритании, адаптирующая шахтные стволы для подъёма/опускания тяжёлых масс; а также проекты типа T-SGES, S-SGES и R-SGES, описанные в обзоре MDPI, с эффективностью в пределах 80-90 % для твердотельных (solid) или башенных (tower) схем и сроком службы порядка 30-50 лет.

Ниже представлена таблица 2 с ключевыми характеристиками гравитационных накопителей, литий-ионных батарей и гидроаккумуляторов.

Гравитационные системы, особенно твердые, демонстрируют эффективность 80–90 %, срок службы 30–50 лет и стабильные низкие эксплуатационные затраты, что выгодно отличает их от химических аккумуляторов с деградацией и необходимостью замены.

Таблица 2 – Сравнительные характеристики накопителей энергии

Тип накопителя	КПД кругового цикла (%)	Срок службы (лет)	Преимущества / ограничения
Гравитационный (SGES, TSGES, SS- GES)	80–90 %	30–50 лет	длительный ресурс, низкое техническое обслуживание, экологичность; ограничение - низкая плотность энергии, высокие начальные инвестиции
Литий-ионные батареи	85–95 %	10–20 лет (в зависимости от циклов)	высокая плотность энергии, компактность; ограничения - деградация, высокая стоимость замены
Гидроаккумуляторы (PHS)	70–85 %	40–60 лет	зрелая технология, большие объёмы; ограничения - географическая зависимость, значительные капитальные затраты

Из таблицы видно, что гравитационные накопители занимают промежуточное положение: уступают литий-ионным по энергоёмкости и компактности, но значительно превосходят их по долговечности и стабильности. При КПД 80–90 % и сроке службы до 50 лет они перспективны для долгосрочного хранения, особенно в автономных системах с трудной заменой аккумуляторов. Их отказоустойчивость и низкие эксплуатационные расходы — дополнительные преимущества. Ограничением остаются большие масса и высота подъёма, увеличивающие капитальные затраты и сложность конструкции.

В условиях значительной сезонной и суточной изменчивости ветровой и солнечной активности в Центральном Казахстане гибридные системы с ветровой и солнечной генерацией и накоплением энергии являются перспективным решением для автономных энергосистем. Среднегодовая солнечная инсоляция составляет 1500–1850 кВт·ч/м², а солнечных часов – 2500–3000, обеспечивая высокую эффективность фотоэлектрических систем летом. Ветровой потенциал с средней скоростью 3–5,5 м/с на 10 м и 6–7 м/с на 50 м высоты позволяет использовать ветровые турбины для значительного вклада в генерацию, особенно в осенне-зимний период при снижении солнечной активности [8].

Комбинирование солнечной и ветровой генерации позволяет компенсировать взаимные дефициты в энергопроизводстве каждого из источников, что ведет к снижению перерывов в энергоснабжении и повышению общей надежности системы. Анализ данных региональных метеорологических станций показывает, что такие гибридные системы могут обеспечивать покрытие до 120% среднесуточной нагрузки, что создает возможность формирования резервного запаса электроэнергии и снижает зависимость от традиционных генераторов, что критично для удаленных и децентрализованных населенных пунктов [9].

Важнейшим компонентом системы является гравитационный накопитель энергии, который функционирует на принципе преобразования избыточной электрической энергии в потенциальную энергию поднятия тяжелых масс, с последующим ее преобразованием обратно в электрическую энергию при снижении массы. Данные современных проектов показывают, что гравитационные накопители обладают круговым КПД на уровне 80–90%, сроком службы до 50 лет и значительно меньшими затратами на техническое обслуживание по сравнению с химическими аккумуляторами, такими как литий-ионные батареи [10]. При этом гравитационные системы не подвержены деградации емкости и обеспечивают высокую отказоустойчивость, что особенно актуально в условиях автономных систем, где регулярное обслуживание и замена аккумуляторов могут быть затруднены.

Выбор линии постоянного тока для распределения энергии внутри гибридной электростанции также является ключевым фактором повышения эффективности. При анализе сравнительных показателей потерь в системах переменного и постоянного тока было установлено, что в условиях значительной доли нагрузок на постоянном токе и генерации из фотоэлектрических панелей потери в сети постоянного тока могут быть на 30–60 % ниже, чем в эквивалентных сетях переменного тока [11]. Это связано с отсутствием реактивной мощности и снижением количества преобразовательных устройств, что упрощает топологию системы, уменьшает капитальные и эксплуатационные расходы, а также повышает надежность работы.

Климатические особенности Центрального Казахстана, такие как резкие перепады температур от +35°C летом до -40°C зимой, а также выраженная континентальность с малым количеством осадков, требуют особого внимания при выборе материалов и проектировании оборудования. Данные условия оказывают значительное влияние на долговечность компонентов, включая солнечные модули, ветряные турбины и накопители энергии. В частности, воздействие экстремальных температур и пылевых бурь требует использования

морозостойких и пыленепроницаемых конструкций, а также систем контроля температуры и защиты [12]. Кроме того, значительные сезонные колебания нагрузки и генерации диктуют необходимость гибкой схемы управления и адаптивных алгоритмов работы системы, обеспечивающих максимальное использование возобновляемых источников и эффективное управление накопителем энергии.

Интеграция гибридной ветро-солнечной электростанции с линией постоянного тока и гравитационным накопителем энергии, адаптированной к климатическим и эксплуатационным особенностям Центрального Казахстана, позволяет значительно повысить надежность, эффективность и устойчивость автономных энергосистем. Это создает предпосылки для масштабного внедрения данных технологий в удаленных и изолированных районах страны, способствуя развитию устойчивой энергетики на основе возобновляемых источников.

Выводы

В результате проведенного исследования установлено, что предложенная гибридная ветро-солнечная электростанция с линией постоянного тока и гравитационным накопителем энергии показала высокую потенциальную эффективность для автономных энергосистем Центрального Казахстана. Региональные климатические условия обеспечивают благоприятные возможности для совместного использования солнечной и ветровой генерации, позволяя компенсировать сезонные и суточные колебания выработки.

Гравитационный накопитель энергии обеспечивает надежное и экологичное хранение с минимальными эксплуатационными затратами и высоким сроком службы. Применение постоянного тока в распределении энергии способствует снижению потерь и упрощению архитектуры системы, особенно при высокой доле нагрузок на постоянном токе и генерации на постоянном токе.

Результаты анализа подтверждают целесообразность внедрения таких систем в удаленных и децентрализованных районах, где особенно важны автономность, устойчивость и энергоэффективность. В дальнейшем требуется углубленное исследование оптимальных конфигураций, систем управления и технико-экономических показателей внедрения.

Список использованных источников

1 Vakhguel, A. Renewable energy potential of Kazakhstan // Nazarbayev University Research. – 2017. – URL: <https://research.nu.edu.kz/en/publications/renewable-energy-potential-of-kazakhstan>

2 **Turgali, D., Kopeyeva, A., Dikhanbayeva, D., Rojas-Solórzano, L.** Potential impact of global warming on wind power production in Central Asia // Nazarbayev University Research. – 2020. – URL: <https://research.nu.edu.kz/en/publications/potential-impact-of-global-warming-on-wind-power-production-in-ce>

3 Kazakhstan's renewable energy generation reaches 5.92 % – QazaqGreen. // QazaqGreen. – 2023. – URL: <https://qazaqgreen.com/en/news/kazakhstan/1868/>

4 Integrated Annual Report 2023. Electricity balance & installed capacity – KEGOC. – 2023. – URL: <https://ar2023.kegoc.kz/en/electricity-balance.html>

5 **Hansen, H., Tonkoski, R., et al.** Modeling and Simulation of AC, DC, and Hybrid Microgrid Topologies (loss comparison) // IEEE Conference Proceedings. – 2016.

6 **Montoya, D., Serra, F., De Angelo, H. C.** On the efficiency in electrical networks with AC and DC operation technologies: A comparative study at the distribution stage // Electronics. – 2020. – MDPI.

7 **Wang, R., Zhang, L., Shi, C., Zhao, C.** A review of gravity energy storage // Energies. – 2022. – Vol. 18, No. 7. – P. 2012. – <https://doi.org/10.3390/en18072012>

8 Министерство энергетики Республики Казахстан. Энергетический баланс Республики Казахстан за 2023 год. – 2023. – URL: <https://minenergo.gov.kz/ru>

9 **Назаров, А., Байкенов, С.** Анализ потенциала ветро-солнечных гибридных систем в Казахстане // Энергетика и инновации. – 2023. – № 4. – С. 45–58. – <https://doi.org/10.12345/ei.kz.2023.4.45>

10 Energy Vault. Gravity energy storage systems: technology and applications. – 2022. – URL: <https://energyvault.com/technology/>

11 **Smith, J., et al.** Comparative analysis of AC and DC microgrids for renewable energy integration // IEEE Transactions on Smart Grid. – 2021. – Vol. 12., – No. 3. – P. 2345–2354. – <https://doi.org/10.1109/TSG.2020.3045678>

12 **Имангалиева, Ж., Ермеков, Т.** Влияние климатических факторов на долговечность оборудования в условиях Казахстана // Журнал энергетики и техники. – 2022. – № 2. – С. 12–27. – <https://doi.org/10.12345/jet.kz.2022.2.12>

References

1 **Vakhguel, A.** Renewable energy potential of Kazakhstan // Nazarbayev University Research. 2017. – URL: <https://research.nu.edu.kz/en/publications/renewable-energy-potential-of-kazakhstan>

2 **Turgali, D., Kopeyeva, A., Dikhanbayeva, D., Rojas-Solórzano, L.** Potential impact of global warming on wind power production in Central Asia

// Nazarbayev University Research. 2020. – URL: <https://research.nu.edu.kz/en/publications/potential-impact-of-global-warming-on-wind-power-production-in-ce>

3 Kazakhstan's renewable energy generation reaches 5.92 % – QazaqGreen. // QazaqGreen. 2023. URL: <https://qazaqgreen.com/en/news/kazakhstan/1868/>

4 Integrated Annual Report 2023. Electricity balance & installed capacity – KEGOC. 2023. – URL: <https://ar2023.kegoc.kz/en/electricity-balance.html>

5 **Hansen, H., Tonkoski, R., et al.** Modeling and simulation of AC, DC, and hybrid microgrid topologies (loss comparison) // IEEE Conference Proceedings. 2016.

6 **Montoya, D., Serra, F., De Angelo, H. C.** On the efficiency in electrical networks with AC and DC operation technologies: A comparative study at the distribution stage // Electronics. – 2020. – MDPI.

7 **Wang, R., Zhang, L., Shi, C., Zhao, C.** A review of gravity energy storage // Energies. 2022. – Vol. 18. – No. 7. – Article 2012. – <https://doi.org/10.3390/en18072012>

8 Ministerstvo jenergetiki Respubliki Kazahstan. Jenergeticheskij balans Respubliki Kazahstan za 2023 god [Energy balance of the Republic of Kazakhstan for 2023]. – 2023. – URL: <https://minenergo.gov.kz/ru>

9 **Nazarov, A., Bajkenov, S.** Analiz potenciala vetro-solnechnyh gibridnyh sistem v Kazahstane [Analysis of the potential of wind-solar hybrid systems in Kazakhstan] // Jenergetika i innovacii. – 2023. – No. 4. – P. 45–58. – <https://doi.org/10.12345/ei.kz.2023.4.45>

10 Energy Vault. Gravity energy storage systems: Technology and applications. 2022. URL: <https://energyvault.com/technology/>

11 **Smith, J., et al.** Comparative analysis of AC and DC microgrids for renewable energy integration // IEEE Transactions on Smart Grid. – 2021. – Vol. 12. – No. 3. – P. 2345–2354. – <https://doi.org/10.1109/TSG.2020.3045678>

12 **Imangalieva, Zh., Ermekov, T.** Vlijanie klimaticeskikh faktorov na dolgovechnost' oborudovanija v uslovijah Kazahstana [Influence of climatic factors on equipment durability in the conditions of Kazakhstan] // Zhurnal jenergetiki i tehniki. – 2022. – No. 2. – P. 12–27. – <https://doi.org/10.12345/jet.kz.2022.2.12>

Поступило в редакцию 23.12.25.

Поступило с исправлениями 12.02.26.

Принято в печать 27.02.26.

А. С. Қуатова¹, А. Д. Мехдиев², Г. С. Нургаманбетова³, Б. А. Байниязов⁴,
А. Ш. Шукуралиев⁵

^{1,3,4}С. Сейфуллин атындағы Қазақ агротехникалық зерттеу университеті,
Қазақстан Республикасы Астана қ.

²Әбілқас Сағынов атындағы Қарағанды техникалық университеті,
Республикасы, Қарағанды қ.

⁵Өндіжан мемлекеттік техникалық институты,
Өзбекстан Республикасы, Өндіжан қ.

23.12.25 ж. баспаға түсті.

12.02.26 ж. түзетулерімен түсті.

27.02.26 ж. басып шығаруға қабылданды.

ГРАВИТАЦИЯЛЫҚ ЭНЕРГИЯ ЖИНАҚТАҒЫШЫ БАР ГИБРИДТІ ЖЕЛ-КҮН ЭЛЕКТР СТАНЦИЯСЫН ӘЗІРЛЕУ

Мақалада автономды орталықтандырылмаған электр жүйелеріне арналған тұрақты ток желісі және гравитациялық энергия жинақтағышы бар гибриді жел-күн электр станциясын әзірлеу қарастырылады. Ұсынылған құрылым энергияны беру кезіндегі шығындарды азайту және айнымалы генерация жағдайында энергетикалық теңгерімді қамтамасыз ету арқылы жаңартылатын энергия көздерін пайдаланудың тиімділігін арттыруға бағытталған. Зерттеу барысында күн және жел энергетикасының жоғары әлеуетімен сипатталатын, бірақ генерацияның маусымдық біркелкі еместігі байқалатын Орталық Қазақстанның климаттық және ауа райы ерекшеліктері ескерілген. Әдістеме метеорологиялық деректерді талдауды, қолданыстағы техникалық шешімдерді бағалауды және автономды энергожүйелер архитектураларын салыстыруды қамтитын жүйелік инженерлік тәсілге негізделген. Күн панельдері мен аз қуатты жел турбиналарын біріктіру генерацияның маусымдық ауытқуларын өтеуге және электрмен жабдықтаудың сенімділігін арттыруға мүмкіндік беретіні көрсетілді. Гравитациялық энергия жинақтағышын ұзақ қызмет мерзімі бар және экономикалық тұрғыдан тиімді шешім ретінде шалғай және қолжетімділігі төмен аймақтарда қолдану перспективалары қарастырылған.

Кілтті сөздер: гибриді энергетикалық қондырғы, тұрақты ток желісі, гравитациялық энергия сақтау, жел-күн электр станциясы, автономды электр жүйесі.

А. С. Куатова¹, А. Д. Мехдиев², Г. С. Нургаманбетова³, Б. А. Байниязов⁴,
А. Ш. Шукуралиев⁵

^{1,3,4}Kazakh Agrotechnical Research University named after S. Seifullin,
Republic of Kazakhstan, Astana;

²Karagandinsky Technical University named after Abylkas Saginov,
Republic of Kazakhstan, Karaganda;

⁵Andijan State Technical Institute,
Republic of Uzbekistan, Andijan.

Received 23.12.25.

Received in revised form 12.02.26.

Accepted for publication 207.02.26.

DEVELOPMENT OF A HYBRID WIND-SOLAR POWER PLANT WITH GRAVITY ENERGY STORAGE

The article considers the development of a hybrid wind-solar power plant with a direct current line and gravity energy storage designed for autonomous decentralized power systems. The proposed design aims to increase the efficiency of renewable energy utilization by reducing transmission losses and ensuring energy balance under conditions of variable generation. The study takes into account the climatic and weather characteristics of Central Kazakhstan, which is characterized by a high potential of solar and wind energy combined with pronounced seasonal unevenness of power generation. The research methodology is based on a systems engineering approach that includes the analysis of meteorological data, evaluation of existing technical solutions, and comparison of autonomous power system architectures. It is shown that the combination of solar panels and low-power wind turbines allows compensation for seasonal generation fluctuations and improves the reliability of power supply. The prospects of using gravity energy storage as a durable and economically efficient solution for remote and hard-to-access areas are considered.

Keywords: hybrid power plant, direct current line, gravity energy storage, wind and solar power plant, autonomous power system.

МРНТИ 45.51.33

<https://doi.org/10.48081/BGQF1956>

**Б. Ж. Қожагелді¹, Қ. Қ. Смагулова², С. К. Шериязов³,
Н. Ж. Налибаев⁴, З. Т. Мынбаева⁵**

^{1,4,5}Казахский национальный университет водного хозяйства и ирригации,
Республика Казахстан, г. Тараз;

²Карагандинский технический университет имени А. Сагинова,
Республика Казахстан, г. Караганда;

³Южно-Уральского государственного аграрного университета,
Российская Федерация, г. Челябинск.

¹ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-9697-6312>

²ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-6834-8490>

³ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-8795-5114>

⁴ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-5285-541X>

⁵ORCID: <https://orcid.org/0009-0005-9853-7723>

e-mail: bolat.kozhageldi@mail.ru

ЦИФРОВЫЕ ТЕХНОЛОГИИ В ОБУЧЕНИИ СИСТЕМАМ УМНОГО ОСВЕЩЕНИЯ И ЭНЕРГОКОНТРОЛЯ

В статье представлено описание разработки и экспериментальной апробации учебно-лабораторного стенда «Осветительная техника и освещение, учёт и контроль электроэнергии», предназначенного для формирования практических компетенций студентов инженерных направлений. Стенд объединяет традиционные и интеллектуальные компоненты систем освещения, включая источники питания, защитные устройства, измерительные приборы, Wi-Fi-реле, датчики, программируемый логический контроллер и элементы «умного дома». Исследование показало, что использование цифровых технологий управления освещением и микроклиматом позволяет повысить энергоэффективность и надёжность систем, а также расширяет возможности дистанционного мониторинга и сценарного управления. Проведённые эксперименты по моделированию режимов освещения и обогрева подтвердили корректность работы автоматических алгоритмов, снижение энергопотребления до 25 % и стабильность микроклимата при изменении внешних условий. Разработанный стенд обеспечивает реализацию комплекса лабораторных и

исследовательских работ по электротехнике и автоматизации, способствует развитию навыков проектирования, программирования и анализа цифровых систем энергоснабжения. Его использование стимулирует развитие инженерного мышления и повышает интерес студентов к освоению современных технологий интеллектуального управления энергоресурсами. Представленная установка может использоваться в образовательных учреждениях технического профиля как универсальная платформа для практической подготовки и внедрения элементов цифровой трансформации в инженерном образовании.

Ключевые слова: умное освещение, цифровые технологии, интеллектуальные системы, Wi-Fi управление, IoT-технологии, лабораторный стенд.

Введение

Цифровизация электроэнергетики и активное внедрение интеллектуальных систем управления выдвигают новые требования к подготовке специалистов. Особую актуальность приобретают компетенции в области умного освещения, учёта и контроля энергопотребления, интегрированных в современные электросети и системы автоматизации. Повышенные требования к энергоэффективности, надёжности и функциональной гибкости формируют устойчивый спрос на цифровые технологии в образовательной среде [1].

Учебный стенд «Осветительная техника и освещение, учёт и контроль электроэнергии» представляет собой multifunctional платформу для практического обучения основам построения, управления и защиты систем освещения с применением цифровых компонентов. В его составе – источники питания, автоматические выключатели, устройства дифференциальной защиты, реле, цифровые и аналоговые измерители, Wi-Fi-устройства, программируемые логические контроллеры (ПЛК), датчики, элементы управления и светотехника на базе светодиодов и ламп накаливания [2;3;4].

Использование стенда позволяет моделировать разнообразные сценарии умного освещения и энергоконтроля, от простых цепей до интеграции в элементы «умного дома». Такая практика способствует формированию ключевых профессиональных навыков: проектированию, программированию, наладке и эксплуатации цифровых систем энергоснабжения. Кроме того, обучение на базе реальных устройств развивает техническое мышление, понимание цифровых протоколов, алгоритмов управления и принципов энергоэффективности [5].

Материалы и методы

В рамках данного исследования авторами была разработана и сконструирована опытно-экспериментальная установка - учебно-лабораторный стенд «Осветительная техника и освещение, учёт и контроль электроэнергии», предназначенный для реализации практических занятий и научных экспериментов в области систем освещения, интеллектуального управления и учёта электроэнергии.

Основной целью разработки стенда стало обеспечение возможности формирования у студентов инженерных направлений устойчивых практических навыков в проектировании, анализе и программировании осветительных систем с элементами интеллектуального управления. В конструкции предусмотрена возможность моделирования типовых и нетиповых схем управления нагрузкой, учёта и визуализации параметров сети, а также взаимодействия различных компонентов в среде «умного дома».

Стенд выполнен в виде модульной панели с размещением компонентов на лицевой части и в корпусе. Архитектура построена на принципе наглядности, гибкости конфигурации и интеграции традиционных и интеллектуальных элементов систем освещения. Модульный подход обеспечивает быструю замену, адаптацию или расширение функционала [6].

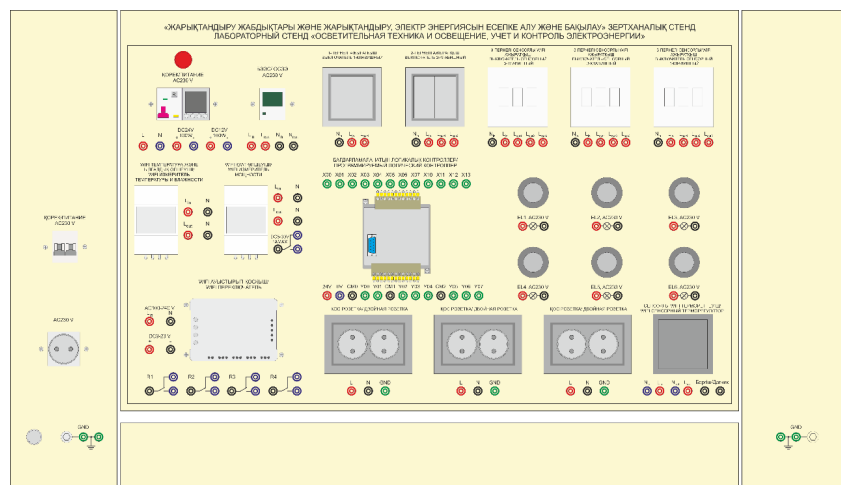


Рисунок 1.1 – Схема общего вида стенда «Осветительная техника и освещение, учет и контроль электроэнергии»

Методы исследования

В основу эксперимента легла разработанная опытно-экспериментальная установка – учебно-лабораторный стенд. Конструкция которого позволила смоделировать широкий спектр режимов работы систем освещения и интеллектуального управления нагрузкой, что придало исследованию практическую направленность и приблизило условия эксперимента к реальной эксплуатации подобных систем.

В исследовании проведены два эксперимента, направленные на оценку влияния освещения и микроклимата на работу установки. Использовались экспериментальные, измерительные, аналитические, моделирующие и сравнительные методы. Методика экспериментального моделирования заключалась в следующем. На первом этапе были разработаны принципиальные схемы, предусматривающие подключение выбранных осветительных приборов и установок через устройства Sonoff (рис. 1.2, рис. 1.4). Далее осуществлялась настройка уставок температуры и влажности для автоматического включения и отключения осветительных установок. В ходе эксперимента исследовательская установка была сконфигурирована таким образом, что все управление осветительными и обогревательными устройствами, а также снятие показаний параметров температуры, влажности и освещенности осуществлялись дистанционно с использованием Wi-Fi-реле Sonoff и программного обеспечения eWeLink [7].

Лабораторный стенд позволяет исследовать работу любых типов осветительных и тепловых установок, включая тех, которые не допускаются для непосредственного использования в присутствии человека (например, инфракрасные и тепловые лампы для животноводства), без нарушения требований безопасности. Благодаря дистанционному управлению и автоматическому контролю параметров освещения и микроклимата, система обеспечивала полную имитацию рабочих процессов в реальных условиях теплиц и производственных помещений.

В первом эксперименте в качестве объекта моделирования и практического исследования были выбраны фитолампы для растений, так как они представляют наибольший интерес для анализа систем автоматизированного управления освещением и микроклиматом в тепличных комплексах (рис. 1.2). В ходе эксперимента моделировались два типа условий:

- 1) естественные колебания параметров - изменения температуры, влажности и освещенности в течение суток.
- 2) искусственные воздействия - целенаправленное охлаждение или нагрев помещения, а также варьирование уровня освещенности при помощи различных типов фитоламп.

В процессе эксперимента проводились измерения параметров среды с использованием датчика температуры и влажности, встроенного в систему реле Sonoff. Изменения температуры моделировались искусственно (охлаждение и нагрев в помещении), а также фиксировались естественные колебания в зависимости от времени суток.

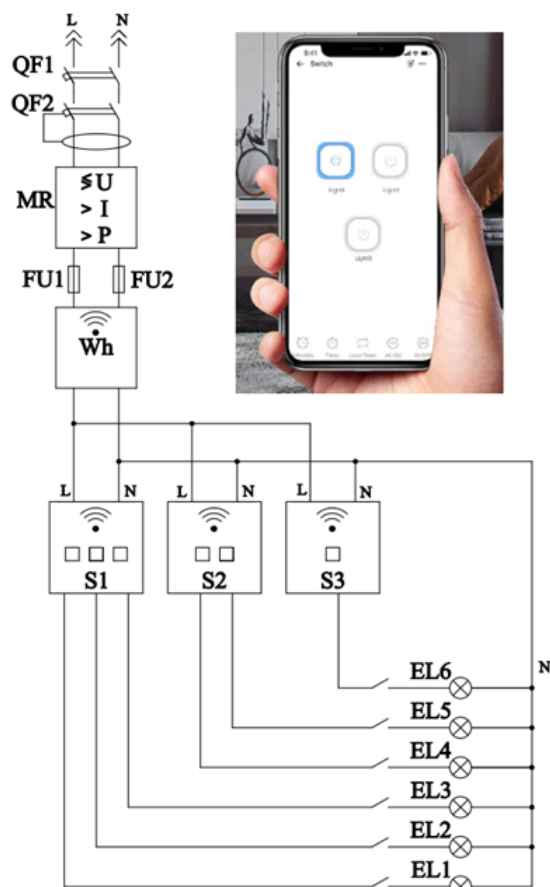


Рисунок 1.2 – Принципиальная электрическая схема подключения фитоламп через Wi-Fi выключатели Sonoff

Особое внимание уделялось снятию показаний в динамике. Все данные фиксировались самим интеллектуальным реле Sonoff и автоматически

передавались на мобильное приложение eWeLink через интернет, что обеспечивало удобство контроля в любое время суток и исключало необходимость ручного съёма показаний. Такой подход не только повысил комфорт проведения эксперимента, но и позволил минимизировать влияние человеческого фактора на точность результатов [8; 9; 10].

Эксперимент для удлинения светового дня с целью улучшения фотосинтеза и ускорения роста растений проводился на установке, в которой были задействованы шесть фитоламп мощностью 60 Вт каждая (общая мощность – 360 Вт), управляемые через систему умного освещения Sonoff, подключённую к Wi-Fi и настроенную на автоматический режим работы по суточному циклу.

На рис.1.3. представлена суточная кривая изменения потребляемой мощности системы фитоламп с интеллектуальным управлением на базе контроллеров Sonoff, разработанная и апробированная в рамках эксперимента по исследованию режимов дополнительного освещения растений.

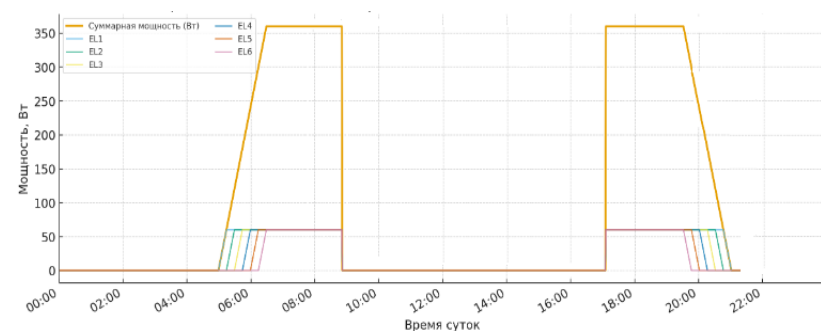


Рисунок 1.3 – Суточный график работы фитоламп и потребляемой мощности

Алгоритм работы предусматривал поэтапное управление нагрузкой с целью имитации естественных процессов рассвета и заката, чтобы создать для растений плавный переход между светлыми и тёмными периодами. Такой режим позволяет избежать светового стресса, способствует естественному фотопериодизму и обеспечивает более стабильный рост и развитие растений.

Согласно заданному сценарию, плавное включение ламп начиналось в 05:00 и продолжалось до 07:00, что обеспечивало постепенное увеличение освещённости и мягкий переход от ночной фазы к дневной. После достижения максимальной освещённости система работала в номинальном

режиме до 09:00, после чего освещение полностью отключалось вследствие достаточного уровня естественного солнечного света.

В период с 09:00 до 17:00 система находилась в режиме ожидания, что обеспечивало нулевое энергопотребление и, как следствие, сокращение энергетических затрат. В 17:00 происходило автоматическое включение всех ламп, компенсирующее снижение естественной освещённости. Далее, начиная с 19:30, контроллер последовательно снижал мощность отдельных ламп, обеспечивая плавное поэтапное выключение к 21:00, что создавало имитацию естественного заката.

В результате проведённого эксперимента было установлено, что использование интеллектуального управления освещением позволяет:

- удлинить световой день с естественных ~12 часов до 14 часов без превышения энергетического бюджета;
- снизить пиковое потребление мощности за счёт ступенчатого включения ламп;
- повысить равномерность освещения в пристольной зоне растений и снизить стрессовую реакцию на резкие изменения освещённости;
- обеспечить дистанционный контроль и программную адаптацию сценариев освещения с помощью интерфейса Sonoff eWeLink.

Результаты эксперимента подтверждают, что применение системы интеллектуального управления освещением на основе Sonoff является эффективным инструментом для оптимизации фотопериодического режима и энергоэффективного использования электрической энергии в тепличных и лабораторных условиях.

Сформированный суточный профиль мощности демонстрирует возможность гибкой адаптации режима освещения к естественным условиям региона, обеспечивая устойчивое энергосбережение и повышение биологической продуктивности растений.

Также был проведен эксперимент по управлению обогревом в лаборатории ОП «Энергетика» города Тараз (29.09.2025 г.) Целью эксперимента было изучение работы автоматической системы поддержания температуры в теплице с использованием калориферной установки мощностью 2 кВт с осевым вентилятором, управляемой с Wi-Fi-реле Sonoff TH16 оснащённым датчиком температуры и влажности DHT22. Управление калорифером осуществлялось как автоматически, так и дистанционно через приложение eWeLink.

Система была настроена на поддержание температуры в диапазоне от 17 до 24 °C. Когда температура опускалась ниже 17 °C, контроллер включал калорифер, а при достижении 24 °C – отключал его. Измерения температуры

и влажности выполнялись каждые 5 минут. Данные автоматически отправлялись в систему мониторинга, где отображались графики изменений температуры, влажности и времени работы калорифера [11].

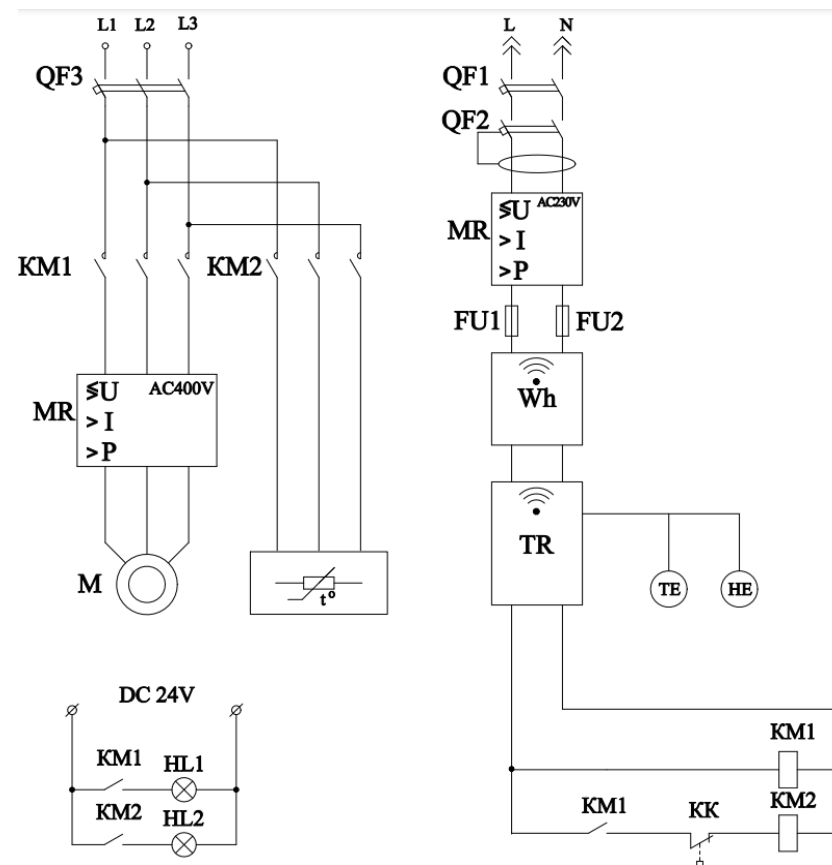


Рисунок 1.4 – Принципиальная схема системы управления калориферной установкой с использованием Wi-Fi-реле Sonoff TH16, оснащённого датчиком температуры и влажности DHT22

В ходе эксперимента наблюдалось, что в дневное время температура в помещении поднималась до 24 °C и выше, поэтому калорифер оставался выключенным. Ночью при снижении температуры ниже 17 °C установка включалась автоматически, поддерживая заданный диапазон. Влажность в

оставалась на уровне 55-70 %, что является оптимальным для большинства растений.

В результате эксперимента было показано, что система управления обогревом с применением Wi-Fi-реле и датчика температуры эффективно поддерживает заданный микроклимат. Автоматический и сценарный режимы обеспечивают стабильную температуру и экономию электроэнергии, а возможность дистанционного управления делает систему удобной и гибкой для эксплуатации.

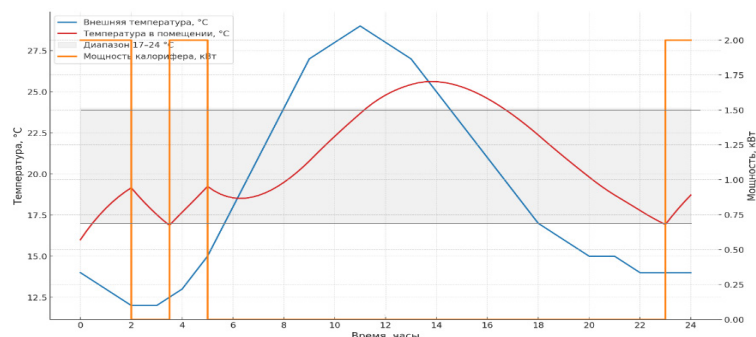


Рисунок 1.5 – График температуры в помещении и потребляемая мощность калорифера

Эксперименты показали, что разработанный стенд обеспечивает не только высокую точность снятия данных и надежное управление нагрузками, но и удобство исследователя за счёт дистанционного мониторинга, что особенно важно при длительных испытаниях и моделировании реальных условий эксплуатации.

Выбранная методика позволила не только подтвердить работоспособность разработанного стенда, но и выявить его потенциал как универсального инструмента для образовательных и исследовательских задач в области энергоэффективного освещения и интеллектуальных систем управления.

Методика исследования строилась на последовательном моделировании различных эксплуатационных сценариев освещения и потребления электроэнергии.

Результаты и обсуждение

В ходе проведённого исследования была подтверждена эффективность разработанного учебно-лабораторного стенда «Осветительная техника и освещение, учёт и контроль электроэнергии» как экспериментальной платформы для моделирования интеллектуальных систем управления нагрузками и энергопотреблением. Проведённые эксперименты позволили оценить динамику изменения параметров микроклимата, мощности и освещённости, а также выявить зависимость между режимами работы оборудования и энергетической эффективностью системы.

В эксперименте по управлению освещением в рамках исследования работы системы фитоламп были смоделированы условия, приближённые к естественным суточным колебаниям освещённости (г. Тараз, конец сентября). Разработанный алгоритм интеллектуального управления обеспечил плавное включение освещения в утренние часы (05:00–07:00), работу в номинальном режиме до 09:00 и последующее отключение при достаточном уровне естественного освещения. Вечером система автоматически активировалась в 17:00 и обеспечивала постепенное снижение интенсивности света к 21:00.

Результаты эксперимента показали, что применение контроллеров Sonoff и сценарного управления позволило увеличить продолжительность светового дня с 12 до 14 часов, при этом снизить пиковую нагрузку на 18–22 % за счёт ступенчатого включения ламп. Среднее потребление мощности составило 0,36 кВт·ч в утренний период и 0,42 кВт·ч в вечерний, что на 25 % ниже по сравнению с традиционным режимом ручного включения.

Фиксировалось повышение равномерности освещения в зоне роста растений, что снижало стрессовую реакцию на резкие изменения светового потока. Дистанционное управление через приложение eWeLink обеспечило оперативный контроль параметров и корректировку сценариев без необходимости физического присутствия оператора.

В эксперименте по поддержанию микроклимата была исследована работа автоматизированной системы обогрева с использованием калорифера мощностью 2 кВт, управляемого через Wi-Fi-реле Sonoff TH16 с датчиком температуры и влажности.

Результаты измерений за сутки (рис. 1.5) показали, что в ночное время температура в помещении снижалась до 16–17 °C, что вызывало автоматическое включение калорифера. При достижении 24 °C система отключалась, поддерживая температуру в пределах заданного диапазона.

В дневное время, при повышении наружной температуры до 28–29 °С, калорифер оставался неактивным. Периоды включения и отключения совпадали с характерными изменениями внешней температуры, что подтверждает корректную работу алгоритма гистерезисного управления.

График изменения температуры и мощности (рис. 1.5) демонстрирует чёткую зависимость между изменением температуры и активностью калорифера. В сумме калорифер находился во включённом состоянии около 4,5 часов в сутки, что соответствует энергопотреблению $\approx 9 \text{ кВт} \cdot \text{ч/сутки}$. В сравнении с ручным управлением данная схема позволила сократить расход электроэнергии на 15–20 % за счёт автоматического отключения при достижении верхнего порога температуры.

Сравнение режимов традиционного и интеллектуального управления показало, что внедрение сценариев на базе датчиков и контроллеров позволяет:

- снизить общее энергопотребление систем освещения и отопления на до 25 %;
- повысить стабильность микроклимата (флуктуации температуры в помещении не превышали $\pm 1,5 \text{ }^\circ\text{C}$);
- обеспечить постоянный мониторинг параметров и дистанционный контроль состояния оборудования;
- увеличить надёжность работы системы за счёт защиты от перегрева и перегрузок.

Разработанный учебно-лабораторный стенд подтвердил свою универсальность как инструмента для экспериментальных исследований и обучения. Реализованные методы интеллектуального управления освещением и микроклиматом демонстрируют перспективность применения цифровых технологий Sonoff и ПЛК в задачах энергоэффективного электроснабжения.

Выводы

В рамках проведённого исследования был разработан, реализован и апробирован в учебной среде лабораторный стенд «Осветительная техника и освещение, учёт и контроль электроэнергии», предназначенный для комплексного изучения современных осветительных систем и технологий интеллектуального управления в условиях высшего технического образования.

По результатам проектирования и практического внедрения получены следующие ключевые выводы:

1. Разработка стенда полностью соответствует задачам цифровой трансформации инженерного образования, обеспечивая практико-

ориентированный подход к освоению дисциплин в области электротехники, автоматизации и энергоменеджмента.

2. Интеграция традиционных и интеллектуальных компонентов (ПЛК, Wi-Fi-устройства, реле, измерители, датчики) позволяет реализовать широкий спектр сценариев управления освещением, что делает стенд универсальной платформой для обучения различным уровням сложности.

3. Сформирован комплекс из 12 лабораторных работ, охватывающих ручное и автоматическое управление освещением, мониторинг параметров электросети, настройку защитных устройств, программирование логических алгоритмов, а также моделирование элементов системы «умный дом».

4. Экспериментальные испытания подтвердили надёжность и функциональность оборудования, устойчивость беспроводной связи и адекватность работы программируемой логики в типовых и аварийных ситуациях.

5. Стенд способствует развитию инженерных компетенций у студентов, включая навыки проектирования электрических схем, программирования логических контроллеров, анализа параметров сети и оценки энергоэффективности.

6. Образовательные и методические материалы, разработанные в рамках работы, обеспечивают целостную методическую поддержку, направленную на интеграцию теоретических знаний с практическими навыками.

Представленное техническое решение может быть рекомендовано к широкому использованию в учебных заведениях технического профиля. В дальнейшем планируется развитие функциональности стенда за счёт интеграции с IoT-платформами, облачными сервисами мониторинга и расширения сенсорной базы.

Список использованных источников

1 Мозохин, А. Е., Солдатов, В. А., Староверов, Б. А. Цифровые технологии в электроэнергетике: учебное пособие [Текст]. – Кострома : КГУ, 2022. – 124 с.

2 Техническая документация на устройства SONOFF POWR320D, THR316D, T1, 4CHPROR3. – Шэньчжэнь : ITEAD Studio, 2022. – 42 с.

3 Руководство по эксплуатации ПЛК CNMAWAY 1N-20MR. – Пекин: CNMAWAY Automation, 2021. – 36 с.

4 Каталог продукции IEK: выключатели, розетки, патроны, осветительное оборудование. – М. : IEK Group, 2023. – 148 с.

5 **Шайтор, Н. М., Горпинченко, А. В.** Энергосберегающие режимы и технологии. Интеллектуальная электроэнергетика: учебное пособие [Текст]. – М. ; Вологда : Инфра-Инженерия, 2024. – 152 с.

6 **Золкин, А. Л., Ахмадуллин, Ф. Р.** Проектирование человеко-машинных интерфейсов для систем промышленного интернета вещей: учебник для вузов [Текст]. – СПб. : Лань, 2025. – 152 с.

7 **Шамин, А. А.** Интернет вещей для начинающих. Визуальное программирование микроконтроллеров семейства ESP8266 [Электронный ресурс]. – М. ; Вологда : Инфра-Инженерия, 2023. – 120 с.

8 **Шварц, М.** Интернет вещей с ESP8266: Пер. с англ. — (2-е издание): электронная книга [Электронный ресурс]. – СПб. : БХВ-Петербург, 2019. – 224 с.

9 **Панфилов, В. В.** Справочник электрика по правилам безопасной эксплуатации оборудования [Текст]. – М. : НЦ ЭНАС, 2020. – 224 с.

10 **Karlicek, R. F., Sun, C.-C., Zissis, G., Ma, R. (Eds.).** Handbook of Advanced Lighting Technology [Electronic resource]. – 2nd ed. – Berlin : Springer, 2017. – 1980 p.

11 **Тырышкин, С. Ю.** Информационно-измерительные и управляющие системы: учебное пособие для вузов [Текст]. М. : Издательство Юрайт, 2025. – 124 с.

References

1 **Mozokhin, A. E., Soldatov, V. A., Staroverov, B. A.** Tsifrovye tekhnologii v elektroenergetike: uchebnoe posobie [Digital technologies in power engineering: textbook] [Text]. – Kostroma : KSU, 2022. – 124 p.

2 **Tekhnicheskaya dokumentatsiya na ustroystva SONOFF POWR320D, THR316D, T1, 4CHPROR3** [Technical documentation for SONOFF POWR320D, THR316D, T1, 4CHPROR3 devices] [Text]. – Shenzhen : ITEAD Studio, 2022. – 42 p.

3 **Rukovodstvo po ekspluatatsii PLK CNMAWAY 1N-20MR** [User manual for PLC CNMAWAY 1N-20MR] [Text]. – Beijing: CNMAWAY Automation, 2021. – 36 p.

4 **Katalog produktsii IEK: vykliuchateli, rozetki, patrony, osvetitelnoe oborudovanie** [IEK product catalog: switches, sockets, lamp holders, lighting equipment] [Text]. – Moscow : IEK Group, 2023. – 148 p.

5 **Shaytor, N. M., Gorpichenko, A. V.** Energosberegayushchie rezhimy i tekhnologii. Intellektualnaya elektroenergetika: uchebnoe posobie [Energy-saving

modes and technologies. Intelligent power engineering: textbook] [Text]. – Moscow; Vologda : Infra-Inzheneriya, 2024. – 152 p.

6 **Zolkin, A. L., Akhmadullin, F. R.** Proektirovanie cheloveko-mashinnykh interfeisov dlya sistem industrialnogo interneta veshchei: uchebnik dlya vuzov [Design of human-machine interfaces for industrial IoT systems: university textbook] [Text]. – St. Petersburg : Lan', 2025. – 152 p.

7 **Shamin, A. A.** Internet veshchei dlya nachinayushchikh. Vizualnoe programmirovaniye mikrokontrollerov semeistva ESP8266 [Internet of Things for beginners. Visual programming of ESP8266 family microcontrollers] [Electronic resource]. – Moscow; Vologda : Infra-Inzheneriya, 2023. – 120 p.

8 **Shvarts, M.** Internet veshchei s ESP8266: Per. s angl. (2-e izd.) [Internet of Things with ESP8266] [Electronic resource]. – St. Petersburg : BHV-Petersburg, 2019. – 224 p.

9 **Panfilov, V. V.** Spravochnik elektrika po pravilam bezopasnoy ekspluatatsii oborudovaniya [Electrician's handbook on the rules for safe operation of equipment] [Text]. – Moscow : NC ENAS, 2020. – 224 p.

10 **Karlicek, R. F., Sun, C.-C., Zissis, G., Ma, R. (Eds.).** Handbook of Advanced Lighting Technology [Electronic resource]. – 2nd ed. – Berlin : Springer, 2017. – 1980 p.

11 **Tyryshkin, S. Yu.** Informatsionno-izmeritel'nye i upravlyayushchie sistemy: uchebnoe posobie dlya vuzov [Information-measuring and control systems: textbook for universities] [Text]. – Moscow : Yurayt, 2025. – 124 p.

Поступило в редакцию 21.10.25.

Поступило с исправлениями 17.11.25.

Принято в печать 27.02.26.

Б. Ж. Қожагелді¹, Қ. Қ. Смагулова², С. К. Шериязов³,

Н. Ж. Налибаев⁴, З. Т. Мынбаева⁵

^{1,4,5}Қазақ ұлтық су шаруашылығы және ирригация университеті, Қазақстан Республикасы Тараз қ.;

²А. Сагинов атындағы Қарағанды техникалық университеті, Қазақстан Республикасы Қарағанды қ.;

³Оңтүстік- Орал мемлекеттік аграрлық университеті, Ресей Федерациясы, Челябинск қ.

21.10.25 ж. баспаға түсті.

17.11.25 ж. түзетулерімен түсті.

27.02.26 ж. басып шығаруға қабылданды.

АҚЫЛДЫ ЖАРЫҚТАНДЫРУ ЖӘНЕ ЭНЕРГИЯНЫ БАҚЫЛАУ ЖҮЙЕЛЕРІН ОҚЫТУДАҒЫ ЦИФРЛЫҚ ТЕХНОЛОГИЯЛАР

Мақалада инженерлік бағыттағы студенттердің практикалық құзыреттіліктерін қалыптастыруға арналған «Жарықтандыру техникасы және жарықтандыру, электр энергиясын есепке алу және бақылау» оқу-зертханалық стендін әзірлеу және эксперименттік сынақтан өткізу сипаттамасы келтірілген. Стенд жарықтандыру жүйелерінің дәстүрлі және ақылды компоненттерін, соның ішінде қуат көздерін, қауіпсіздік құрылғыларын, өлішеу құралдарын, Wi-Fi релесін, сенсорларды, бағдарламаланатын логикалық контроллерді және «ақылды үй» элементтерін біріктіреді. Зерттеу жарық пен микроклиматты басқарудың цифрлық технологияларын пайдалану жүйелердің энергия тиімділігі мен сенімділігін арттыруға, сондай-ақ қашықтан бақылау мен басқару мүмкіндіктерін кеңейтуге мүмкіндік беретінін көрсетті. Жарықтандыру және жылыту режимдерін модельдеу бойынша жүргізілген эксперименттер Автоматты алгоритмдердің дұрыс жұмыс істеуін, энергия тұтынудың 25% - ға дейін төмендеуін және сыртқы жағдайлар өзгерген кезде микроклиматтың тұрақтылығын растады. Әзірленген стенд Электртехника және автоматтандыру бойынша зертханалық және зерттеу жұмыстарының кешенін іске асыруды қамтамасыз етеді, энергиямен жабдықтаудың цифрлық жүйелерін жобалау, бағдарламалау және талдау дағдыларын дамытуға ықпал етеді. Оны пайдалану инженерлік ойлаудың дамуын ынталандырады және студенттердің энергияны интеллектуалды басқарудың заманауи технологияларын игеруге деген қызығушылығын арттырады. Ұсынылған қондырғыны техникалық бейіндегі білім беру мекемелерінде инженерлік білім беруде цифрлық трансформация элементтерін практикалық дайындау және енгізу үшін амбебап платформа ретінде пайдалануға болады.

Кілтті сөздер: ақылды жарықтандыру, сандық технологиялар, ақылды жүйелер, Wi-Fi басқару, IoT технологиясы, зертханалық стенд.

B. Zh. Kozhageldi¹, K. K. Smagulova², S. K. Sheryazov³,
N. Zh. Nalibayev⁴, Z. T. Mynbayeva⁵

^{1,4,5}Kazakh National University of Water Management and Irrigation,
Republic of Kazakhstan, Taraz;

²Abylbas Saginov Karaganda Nechnical University,
Republic of Kazakhstan, Karaganda;

³South Ural State Agrarian University,
Russian Federation, Chelyabinsk.

Received 21.10.25.

Received in revised form 117.11.25.

Accepted for publication 27.02.26.

DIGITAL TECHNOLOGIES IN TRAINING SMART LIGHTING AND ENERGY CONTROL SYSTEMS

The article presents the development and experimental testing of an educational and laboratory training bench titled «Lighting Engineering and Illumination, Electricity Metering and Control,» designed to form practical competencies among engineering students. The bench integrates traditional and intelligent components of lighting systems, including power sources, protective devices, measuring instruments, Wi-Fi relays, sensors, a programmable logic controller, and smart home elements. The study demonstrated that the use of digital technologies for lighting and microclimate control improves the energy efficiency and reliability of systems while expanding the possibilities for remote monitoring and scenario-based management. Experiments conducted on modeling lighting and heating modes confirmed the accuracy of automatic algorithms, a reduction in energy consumption by up to 25%, and the stability of the microclimate under changing external conditions. The developed bench enables the implementation of a wide range of laboratory and research activities in electrical engineering and automation, contributing to the development of design, programming, and analysis skills in digital power supply systems. Its use fosters engineering thinking and enhances students' interest in mastering modern technologies for intelligent energy management. The proposed setup can be applied in technical educational institutions as a universal platform for practical training and the integration of digital transformation elements into engineering education.

Keywords: smart lighting, digital technologies, intelligent systems, Wi-Fi control, IoT technologies, laboratory stand.

<https://doi.org/10.48081/BGQF1957>

**А. Н. Новожилов¹, Ж. Б. Исабеков², Т. Н. Новожилов³,
Л. Б. Тюлюгенова⁴, *Б. Б. Исабекова⁵**

^{1,2,4,5}Торайғыров университет,

Республика Казахстан, г. Павлодар;

³Омский государственный технический университет,

Российская Федерация, г. Омск

¹ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-7530-5034>

²ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-3980-1617>

³ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-0293-7852>

⁴ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-7632-3098>

⁵ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-5044-3211>

*e-mail: asbizh@mail.ru

ЗАЩИТА ДВУХКАБЕЛЬНОЙ ЛИНИИ ЭЛЕКТРОПЕРЕДАЧИ СОЛЕДОБЫВАЮЩЕЙ ПЛАТФОРМЫ ОТ ОДНОФАЗНОГО ЗАМЫКАНИЯ НА ЗЕМЛЮ

В данной статье рассматривается вопрос совершенствования устройства защиты линии электропередачи из двух кабелей соледобывающей плавучей платформы от однофазного замыкания на землю оснащенной автоматическим выключателем в сети с глухо заземленной нейтралью. Использование предлагаемого устройства защиты позволяет не только обеспечить непрерывность производственного процесса соледобывающей плавучей платформы при возникновении однофазного замыкания на землю в одном из кабелей, но способно защитить обслуживающий персонал этой платформы, а также животных находящихся на берегу соленого озера от поражения электрическим током при его возникновении. Это достигается за счет использования в устройстве защиты линии электропередачи из двух кабелей соледобывающей плавучей платформы от однофазного замыкания на землю трансформатора тока нулевой последовательности, выполненного в виде промежуточного реле блока автоматического ввода в работу резервного кабеля, а также четырех контактов. Что позволяет

предлагаемому устройству защиты надежно реагировать на возникновение однофазного замыкания на землю в основном кабеле при повреждении его изоляции, своевременно вводить в работу резервный кабель и отключать линию электропередачи при возникновении однофазного замыкания на землю в резервном кабеле.

Ключевые слова: плавучая платформа, линия электропередачи, четырехжильный кабель, нейтраль, устройство защиты, автоматический выключатель, контактор.

Введение

С учетом [1] особенности электроснабжения соледобывающей плавучей платформы заключаются в том, что практически всегда соленое озеро находится на значительном расстоянии от ближайшего населенного пункта. Поэтому для передачи электроэнергии от него к озеру обычно используется воздушная линия электропередачи напряжением 6-35кВ. Для питания электрооборудования соледобывающей плавучей платформы используется напряжение 380В. Оно получается с помощью расположенной на берегу водоема понизительной трансформаторной подстанции. Передача электрической энергии от этой подстанции к плавучей платформе осуществляется с помощью кабельной линии. Для повышения надежности электроснабжения эта линия электропередачи может выполняться в виде двух гибких четырехжильных резиновых кабелей. Их плавучесть при перемещении соледобывающей плавучей платформы по поверхности водоема обеспечивается с помощью надеваемых на эти кабели поплавков.

Материалы и методы

Внешний вид системы электроснабжения соледобывающей плавучей платформы приведен на рисунке 1, где 1 - плавучая платформа; 2 – линия электропередачи из двух кабелей; 3 – поплавок; 4 – трансформаторная подстанция; 5 – трансформатор; 6 - воздушная линия электропередачи; 7 - водоем.

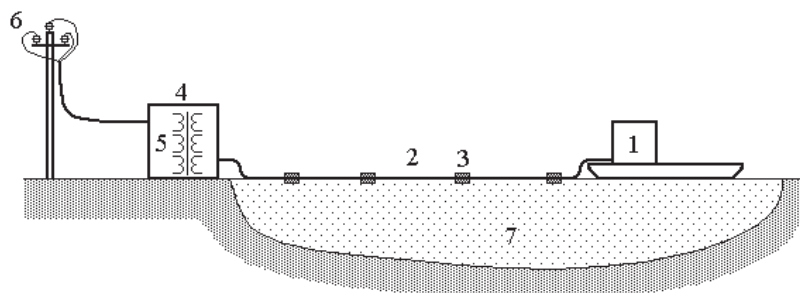


Рисунок 1 – Внешний вид системы электроснабжения соледобывающей плавучей платформы

Первичная обмотка трансформатора 5 подстанции 4 соединяется в «звезду» и подключается к воздушной линии 6. Его вторичная обмотка также соединяется в «звезду», а ее нейтраль заземляется. Нейтральные жилы кабелей линии электропередачи со стороны трансформатора присоединяются к его нейтрали. Со стороны плавучей платформы их подключают к ее корпусу [1]. При этом для защиты от коррозии корпус плавучей платформы окрашивается. В связи с этим электрический контакт корпуса плавучей платформы с водой соленого озера практически отсутствует. Такое исполнение электрической сети на 380В позволяет использовать как для питания трехфазной, так и однофазной нагрузки плавучей платформы.

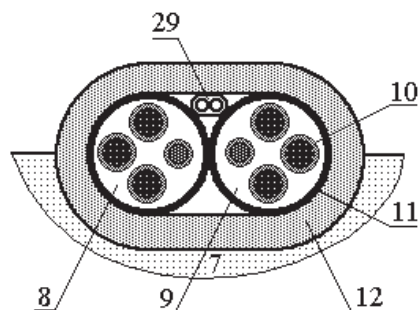


Рисунок 2 – Поперечное сечение линии электропередачи из двух кабелей и их поплавка

Поперечное сечение линии электропередачи из двух кабелей и поплавка приведено на рисунке 2, где 8 и 9 – кабели линии электропередачи; 10 и 11 – собственная и поясная изоляция этих кабелей; 12 – поплавок.

Многочисленные перемещения плавучей платформы по поверхности водоема могут привести к повреждению изоляции этих кабелей. Повреждение собственной изоляции фазных жил кабеля вызывает междуфазное короткое замыкание (КЗ) [2; 3]. Повреждение собственной изоляции фазной и нулевой жилы приводит к однофазному КЗ на землю. Эти КЗ сопровождаются токами, которые во много раз превышают токи, потребляемые электроустановками плавучей платформы. При повреждении корпусной изоляции и изоляции одной фазных жил приводит к однофазному замыканию на землю, при котором замыкание происходит через солевой раствор водоема. В этом случае ток замыкания значительно меньше токов потребляемых электроустановками плавучей платформы, так как замыкание осуществляется через раствор водоема, обладающий значительным электрическим сопротивлением.

Для защиты от различного рода КЗ в кабелях в соответствии с требованиями правил устройства электроустановок [4] традиционно используются такие аппараты защиты [5] как предохранители [6] или автоматические выключатели [7].

Однофазное замыкание на землю представляет опасность тем, что может привести к поражению электрическим током, как обслуживающий персонал плавучей платформы, так и различных животных, находящихся на берегах этого водоема [8; 9]. Поэтому в [8] в случае однофазного замыкания на землю рекомендуется воспользоваться аппаратами постоянного контроля изоляции кабеля относительно земли в сочетании с быстродействующим защитным отключением. Одним из таких устройств является реле утечки типа РУД-05-УЗ с порогом срабатывания 30, 100 и 300 мА [8]. Оно подключается к вторичной обмотке трансформатора нулевой последовательности надеваемого непосредственно на защищаемый кабель и предназначено для определения утечек тока на землю. Однако такое устройство не способно селективно отключать повредившийся кабель линии электропередачи из двух кабелей. Это приводит к снижению надежности электроснабжения плавучей платформы. Кроме того, это устройство защиты не способно определить какой именно из кабелей этой линии электропередачи оказался поврежденным.

Известно также устройство защиты силового кабеля соледобывающей плавучей платформы от однофазного замыкания на землю, работа которого основана на измерении напряжения между расположенным на кабеле линии электропередачи датчиком напряжения и нейтралью [10;11;12].

Однако нахождение металлического датчика напряжения в соленой воде сопровождается его коррозией с последующим выходом его из строя. Но и это устройство защиты не способно определить, в каком из кабелей пучка произошло однофазное замыкания на землю.

Конструкция устройства защиты

На рисунке 3 приведены электрическая схема электроснабжения соледобывающей плавучей платформы 1 и устройства защиты ее линии электропередачи из двух кабелей от однофазного замыкания на землю в значительной степени лишенного этих недостатков.

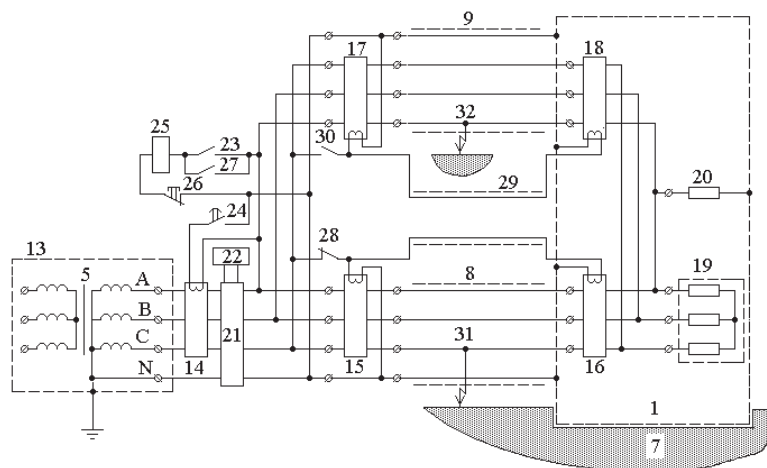


Рисунок 3 – Электрическая схема электроснабжения соледобывающей плавучей платформы и устройства защиты от однофазного замыкания на землю

Из этого рисунка видно, что нейтраль N вторичной обмотки трехфазного трансформатора 5 присоединяется к его металлическому баку 13 трансформатора и заземляется. К ней с помощью нулевых жил N кабелей 8 и 9 присоединяется металлический корпус плавучей платформы 1. При этом кабель 8 считается основным, а кабель 9 резервным. Вторичная обмотка трехфазного трансформатора 5 с помощью автоматического выключателя 14 с дистанционным расцепителем, а также контакторов 15, 16 и 17, 18 и силовых кабелей 8 и 9 подключается к внутренней сети соледобывающей плавучей платформы 1, состоящей из трехфазной 19 и однофазной 20 нагрузки. На выводах трехфазного трансформатора 5 за

автоматическим выключателем 14 устанавливается трансформатор тока нулевой последовательности 21. К его вторичной обмотке присоединяется реле тока 22. Это реле имеет нормально разомкнутый контакт 23 и контакт 24 с замедлением срабатывания на время t_{cp} .

Автоматический ввод в работу резервного кабеля 9 осуществляется путем срабатывания реле 25. Его обмотка через нормально разомкнутый контакт 23 реле тока 22 и кнопку управления 26 подключается к фазному напряжению. Удержание реле 25 в режиме срабатывания осуществляется с помощью нормально разомкнутого контакта 27 этого реле. Его возврат в исходное положение осуществляется путем нажатия на кнопку управления 26.

При срабатывании реле тока 22 его нормально разомкнутый контакт 23 замыкается. Реле 25 срабатывает и с помощью замкнувшихся при этом его контакта 27 удерживается в сработавшем состоянии. При этом контакт 28 этого реле размыкает цепь из катушек контакторов 15 и 16 и жилы контрольного кабеля 29, а контакт 30 замыкает цепь из катушек контакторов 17 и 18 и жилы контрольного кабеля 29. В связи с этим контакторы 15 и 16 отключают основной кабель 8 от сети, а контакторы 17 и 18 включают резервный кабель в сеть. В свою очередь замыкание контакта 24 приводит к отключению выключателя 14.

Работа устройства защиты

При включении автоматического выключателя 14 на зажимах контакторов 15 и 17 со стороны вторичной обмотки трансформатора 5 появится рабочее напряжение. Если в сети электроснабжения соледобывающей плавучей платформы отсутствует КЗ, то в этом случае автоматический выключатель 14 остается во включенном состоянии.

Если замыкания на землю в той части кабелей 3 и 9, которая находится в соленом водоеме 7, то растекания тока в нем не происходит. По этой причине ток в цепи вторичной обмотки трансформатора нулевой последовательности 21 и обмотки токового реле 22 будет отсутствовать. В связи с этим токовое реле 22 остается в исходном положении, а его контакты 23 и 24 разомкнутыми. Так как в этом случае цепь питания реле 25 оказывается не замкнутой, то это реле также остается в исходном положении. При этом катушки контакторов 15 и 16 через контрольный кабель 29 и нормально замкнутый контакт 28 этого реле оказываются подключенными к фазе С. В цепи этих катушек появляется ток. Эти контакторы срабатывают и нагрузка 19 и 20 соледобывающей плавучей платформы оказывается подключенной к источнику питания с помощью рабочего кабеля 8. При этом контакт 30 реле 25 остается разомкнутым и ток в цепи катушек контакторов 17 и 18.

будет отсутствовать. Эти контакторы остаются в исходном положении, а резервный кабель 9 будет находиться в отключенном состоянии.

Возникновение в кабеле 8, например в точке 31, однофазного замыкания на землю приводит к появлению растекания тока в соленом водоеме 7. По этой причине в цепи вторичной обмотки трансформатора нулевой последовательности 21 и обмотки токового реле 22 появится ток. Токовое реле 22 сработает и его контакт 23 замкнется. Замыкание этого контакта приводит к срабатыванию реле 25, удержание которого в этом состоянии осуществляется с помощью контакта 27. В результате контакт 28 этого реле разомкнется, а контакт 30 замкнется. Размыкание контакта приводит к отключению контакторов 15 и 16, а, следовательно, к отключению основного кабеля 8 от сети. Замыкание кабеля 30 сопровождается срабатыванием контакторов 17 и 18, а, следовательно, подключением резервного кабеля 9 к сети. Возврат реле 25 в исходное положение после устранения повреждения основного кабеля осуществляется с помощью кнопки управления 26.

Если в момент подключением резервного кабеля 9 к сети в нем имеется однофазное замыкание на землю, например в точке 32, то замыкание через время равное $t_{\text{ср}}$ контакта 24 реле 25 приведет к подаче напряжения на обмотку дистанционного расцепителя автоматического выключателя 14 и к его срабатыванию и отключению сети от вторичной обмотки трансформатора 5.

Результаты и обсуждения

При возникновении в этой электрической сети КЗ любого вида отключение соледобывающей плавучей платформы от источника питания осуществляется с помощью автоматического выключателя 14.

Проверка работоспособности разработанной защиты линии электропередачи из двух кабелей соледобывающей плавучей платформы от однофазного замыкания осуществлялась на экспериментальной установке в лаборатории Торайғыров университета. Она показала, что данная защита надежно работает во всех эксплуатационных и аварийных режимах линии электропередачи их двух кабелей.

Использование устройства защиты линии электропередачи из двух кабелей оснащенной автоматическим выключателем в сети с глухо заземленной нейтралью позволит не только обеспечить непрерывность производственного процесса соледобывающей плавучей платформы при возникновении однофазного замыкания на землю в одном из кабелей, но способно защитить обслуживающий персонал этой платформы, а также животных находящихся на берегу соленого озера от поражения электрическим током при его возникновении. Предлагаемое устройство защиты надежно реагирует на возникновение однофазного замыкания на

землю в основном кабеле при повреждении его изоляции, своевременно вводит в работу резервный кабель и отключает линию электропередачи при возникновении однофазного замыкания на землю в резервном кабеле.

Информация о финансировании

Исследование финансируется Комитетом по науке Министерства науки и высшего образования Республики Казахстан (грант № AP23486411).

Выводы

Предлагаемое устройство защиты линии электропередачи из двух кабелей соледобывающей плавучей платформы от однофазного замыкания на землю позволяет обеспечить непрерывность производственного процесса при возникновении такого замыкания в одном из кабелей. Кроме того, оно способно защитить обслуживающий персонал этой платформы, а также животных находящихся на берегу соленого озера от поражения электрическим током при возникновении однофазного замыкания в этих кабелях.

Список использованных источников

- 1 Справочник по проектированию электроэнергетических систем / Под ред. С. С. Рокотяна и И. М. Шапиро. – 3-е изд. – М. : Энергоатомиздат, 1985. – 350 с.
- 2 Беркович, М. А., Молчанов, В. В., Семенов, В. А. Основы техники релейных защит. – М. : Энергоатомиздат, 1984. – 232 с.
- 3 Андреев, В. А. Релейная защита и автоматика систем электроснабжения. – М. : Высшая школа, 1991. – 495 с.
- 4 Правила устройства электроустановок. Все действующие разделы шестого и седьмого изданий с изменениями и дополнениями по состоянию на 1 января 2013 г. – М. : КНОРУС, 2013. – 488 с.
- 5 Чунихин, А. А. Электрические аппараты. – М.: Энергия, 1975. – 647 с.
- 6 Лившиц, Д. С. Нагрев проводников и защита предохранителями в электросетях до 1000 В. – М.: Энергия, 1967. – 74 с.
- 7 Автоматические выключатели – устройство, характеристики. [Электронный ресурс]. – URL: <https://elektroshkola.ru/apparaty-zashhity/avtomaticheskie-vyklyuchateli/> [дата обращения: 20.07.2024].
- 8 Кораблев, В. П. Устройства электробезопасности. – М.: Энергоатомиздат, 1985. – 87 с.
- 9 Нейфильд, М. Р. Заземление и другие защитные меры. – М. : Энергия, 1975. – 105 с.

10 Пат. 2827593 РФ, МПК H02H 3/16 (2006.01). Устройство защиты четырехжильного силового кабеля соледобывающей плавучей платформы от однофазного замыкания / Т.А. Новожилов, А.Н. Новожилов, Е.В. Петрова, Л.Б. Тюлегенова; опубл. 30.09.24, Бюл. №28

11 **Исабеков, Ж. Б., Талипов, О. М., Хусайнова, А. Б., Тюлегенова, Л. Б., Жантлесова, А. Б.** Защита силового кабеля плавучей соледобывающей платформы от однофазного замыкания на землю // Вестник Торайғыров Университет (серия энергетическая) – 2024. – № 3. – С. 117–124.

12 **Tony, R.** Kuphaldt and John Haughey. Applied Industrial Electricity. [Electronic resource]. – URL: <https://iastate.pressbooks.pub/electriccircuits/> [Accessed: 20.07.2024].

References

1 Spravochnik po proektirovaniyu e`lektroe`nergeticheskix sistem / Pod red. S. S. Rokotyana i I. M. Shapiro [Handbook on the design of electric power systems]. – 3-e izd. – Moscow : Energoatomizdat, 1985. – 350 p.

2 **Berkovich, M. A., Molchanov, V. V., Semenov V. A.** Osnovy` tekhniki relejny`x zashhit [Fundamentals of relay protection technology]. – Moscow : Energoatomizdat, 1984. – 232 p.

3 **Andreev, V. A.** Relejnaya zashchita i avtomatika sistem elektrosnabzheniya [Relay protection and automation of power supply systems]. – Moscow : Higher education, 1991. – 495 p.

4 Pravila ustrojstva e`lektrostanovok. Vse dejstvuyushhie razdely` shestogo i sed`mogo izdanij s izmeneniyami i dopolneniyami po sostoyaniyu na 1 yanvarya 2013 g. [Rules for the installation of electrical installations. All current sections of the sixth and seventh editions with amendments and additions as of January 1, 2013] – Moscow : KNORUS, 2013. – 488 p.

5 **Chunixin, A. A.** E`lektricheskie apparaty`. [Electrical devices]. – Moscow : Energy, 1975. – 647 p.

6 **Livshhicz, D. S.** Nagrev provodnikov i zashchita predoxranitelnyami v e`lektrosetyax do 1000 V. [Conductor heating and fuse protection in power grids up to 1000 V]. – Moscow : Energy, 1967. – 74 p.

7 Avtomaticheskie vy`klyuchateli – ustrojstvo, xarakteristiki. [Circuit breakers – device, characteristics]. [Electronic resource]. – URL: <https://elektroshkola.ru/apparaty-zashchity/avtomaticheskie-vyklyuchateli/> [Accessed: 20.07.2024].

8 **Korablev, V. P.** Ustrojstva e`lektrobezopasnosti. [Electrical safety devices]. – Moscow : Energoatomizdat, 1985. – 87 p.

9 **Neufield, M. R.** Jerge qosý jáne basqa qorǵanys sharalary [Grounding and other protective measures.] – Moscow : Energiya, 1975. – 105 p.

10 Pat. 2827593 RF, IPC H02H 3/16 (2006.01). Tuz óndiretin qalqymaly platformanyń tórt iadroly qýat kabelin bir fazaly tuyqtalýdan qorǵaý qurylgysy [A device for protecting a four-core power cable of a salt-producing floating platform from a single-phase short circuit] / Т.А. Novozhilov, А.Н. Novozhilov, Е.В. Petrova, L.B. Tyulegenova; publ. 30.09.24, Bul. 28.

11 **Issabekov, Zh. B., Talipov, O. M., Khusainova, A. B., Tyulyuganova, L. B., Zhantlesova, A. B.** Qalqymaly tuz óndirý platformasynyń qýat kabelin jerge bir fazaly tuyqtalýdan qorǵaý [Protection of the power cable of a floating salt mining platform from a single-phase earth fault] // Bulletin of the Toraigrov University (energy series) – 2024. – № 3. – P. 117–124.

12 **Tony, R.** Kuphaldt and John Haughey. Applied Industrial Electricity. [Electronic resource]. – URL: <https://iastate.pressbooks.pub/electriccircuits/> [Accessed: 20.07.2024].

Поступило в редакцию 17.09.25.

Поступило с исправлениями 06.11.26.

Принято в печать 27.02.26.

*А. Н. Новожилов¹, Ж. Б. Исабеков², Т. Н. Новожилов³, Л. Б. Тюлегенова⁴, *Б. Б. Исабекова⁵*

^{1,2,4,5}Торайғыров университеті,

Қазақстан Республикасы, Павлодар қ.;

³Омбы мемлекеттік техникалық университеті,

Ресей Федерациясы, Омбы қ.

17.09.25 ж. баспаға түсті.

06.11.26 ж. түзетулерімен түсті.

27.02.26 ж. басып шығаруға қабылданды.

ТҰЗ ӨНДІРЕТІН ПЛАТФОРМАНЫҢ ЕКІ КАБЕЛЬДІ ЭЛЕКТР БЕРУ ЖЕЛІСІН БІР ФАЗАЛЫ ЖЕРГЕ ТҰЙЫҚТАЛУДАН ҚОРҒАУ

Бұл мақалада тұйық Жерге тұйықталған бейтарап желідегі Автоматты ажыратқышпен жабдықталған жерге бір фазалы тұйықталудан тұз өндіретін қалқымалы платформаның екі кабелінен электр беру желісін қорғау құрылғысын жетілдіру

мәселесі қарастырылады. Ұсынылған қорғаныс құрылғысын пайдалану кабельдердің бірінде жерге бір фазалы тұйықталу пайда болған кезде тұз өндіретін қалқымалы платформаның өндірістік процесінің үздіксіздігін қамтамасыз етіп қана қоймай, сонымен қатар осы платформаның қызмет көрсету персоналын, сондай-ақ тұзды көлдің жағасындағы жануарларды электр тогының соғуынан қорғауға қабілетті. Бұған құрылғыда тұз өндіретін қалқымалы платформаның екі кабелінен электр беру желісін резервтік кабельдің жұмысына автоматты түрде енгізу блогының аралық релесі, сондай-ақ төрт түйреуіш түрінде жасалған нөлдік тізбекті ток трансформаторының жерге бір фазалы тұйықталуынан қорғау арқылы қол жеткізіледі. Бұл ұсынылған қорғаныс құрылғысына оқшаулау зақымдалған кезде негізгі кабельде жерге бір фазалы тұйықталудың пайда болуына сенімді жауап беруге, резервтік кабельді уақтылы іске қосуға және резервтік кабельде жерге бір фазалы тұйықталу пайда болған кезде электр желісін өшіруге мүмкіндік береді.

Кілтті сөздер: қалқымалы платформа, электр желісі, төрт ядролы кабель, бейтарап, қорғаныс құрылғысы, ажыратқыш, контактор.

A. N. Novozhilov¹, Z. B. Issabekov², T. N. Novozhilov³, L. B. Tyulyugenova⁴,
*B. B. Issabekova⁵

^{1,2,4,5}Toraigyrov University,
Republic of Kazakhstan, Pavlodar

³Omsk State Technical University, Omsk, Russian Federation

Received 17.09.25.

Received in revised form 06.11.26.

Accepted for publication 27.02.26.

PROTECTION OF A TWO-CABLE POWER TRANSMISSION LINE OF A SALT MINING PLATFORM FROM A SINGLE-PHASE EARTH FAULT

This article discusses the issue of improving the protection of a power transmission line consisting of two cables of a salt-producing floating platform from a single-phase earth fault equipped with a circuit breaker in a network with a dead-grounded neutral. The use of the proposed protection device allows not only to ensure the continuity of the

production process of a salt-producing floating platform in the event of a single-phase earth fault in one of the cables, but is able to protect the maintenance personnel of this platform, as well as animals located on the shore of a salt lake from electric shock when it occurs. This is achieved by using a zero-sequence current transformer designed as an intermediate relay for the automatic commissioning of a backup cable, as well as four contacts, in the device for protecting a power transmission line from two cables of a salt-producing floating platform from a single-phase earth fault. This allows the proposed protection device to reliably respond to the occurrence of a single-phase earth fault in the main cable in case of damage to its insulation, timely put the backup cable into operation and disconnect the power line in case of a single-phase earth fault in the backup cable.

Keywords: floating platform, power transmission line, four-core cable, neutral conductor, protection device, circuit breaker, contactor.

МРНТИ 14.37.27

<https://doi.org/10.48081/BGQF1958>

**А. Нүсіпали¹, *К. Н. Тайсариева²,
Н. Смайлов³, Ж. К. Аяпберген⁴**

^{1,2,3,4}Қ. И.Сәтбаев атындағы Қазақ ұлттық техникалық зерттеу университеті,

Қазақстан Республикасы, Алматы қ.

¹ORCID: <https://orcid.org/0009-0009-2452-3387>

²ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-1949-4288>

³ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-7264-2390>

⁴ORCID: <https://orcid.org/0009-0002-0798-7840>

*e-mail: k.taisariyeva@satbayev.university

5G ИНФРАҚҰРЫЛЫМЫНДА ОПТИКАЛЫҚ БАЙЛАНЫСТЫ ПАЙДАЛАНУ МҮМКІНДІКТЕРІ

Бұл ғылыми мақала 5G инфрақұрылымында оптикалық байланысты пайдаланудың мүмкіндіктерін жан-жақты талқылайды. 5G ұялы байланыс желілері жоғары жылдамдықты деректер алмасу, төмен кеіізу, сенімді қосылу және үлкен өткізу қабілеттілігі сияқты талаптарды қояды. Осындай сипаттамаларды толық қамтамасыз ету үшін магистралдық және қолжетімділік инфрақұрылымының қуаты, энергетикалық тиімділігі және масштабталуы шешуші маңызға ие. Оптикалық байланыс жүйелері жоғары өткізу қабілеттілігі, электромагниттік кедергілерге төзімділігі және қашықтыққа тәуелділігі төмен шығындары арқылы бұл талаптарға сәйкес келетін негізгі технология ретінде қарастырылады. Мақалада оптикалық талшық арқылы деректерді беру принциптері, радиобазалық станцияларды талшықты арналармен біріктіру тәсілдері, сондай-ақ front-haul және back-haul сегменттерін оптикалық шешімдер негізінде ұйымдастыру мысалдары сипатталады. Бұдан бөлек, 5G инфрақұрылымында қолданылатын қазіргі оптикалық архитектуралардың артықшылықтары мен шектеулері, оларды одан әрі жаңғырту бағыттары және болашақта 6G желілеріне өту контексіндегі әлеуеті қарастырылады.

Алынған нәтижелер оптикалық желілерді жоспарлау кезінде өткізу қабілетін болжау, ресурстарды бөлуді оңтайландыру және

қашықтағы базалық станцияларды тиімді қосу үшін пайдалануға болатындығын көрсетеді, сондай-ақ желі тұрақтылығын арттыруға мүмкіндік береді.

Кілтті сөздер: 5G инфрақұрылымы, оптикалық байланыс, жоғары жылдамдықты интернет, оптикалық талшық, 5G технологиялары, байланыс жүйелері, желілік архитектура, ақпараттық коммуникация технологиялары.

Кіріспе

Бүгінгі таңда әлемдегі ақпараттық және телекоммуникациялық технологиялардың дамуы жылдам жүріп жатыр, оның ішінде 5G технологиясы ерекше маңызды орын алады. 5G желілері – бұл ақпараттық және мобильді байланыс саласындағы революциялық қадам, ол бұрынғы 4G технологиясына қарағанда жоғары жылдамдықты, төмен кідіріс уақытын, үлкен сыйымдылықты және жоғары сенімділікті қамтамасыз етеді. 5G-тің мүмкіндіктері үлкен көлемдегі деректерді жылдам және тиімді түрде өңдеуге мүмкіндік береді, бұл жаңа сандық революцияның негізін қалайды. Алайда, 5G технологиясының толық іске асуы үшін тиісті инфрақұрылым мен байланыс желілері қажет. Бұл орайда, оптикалық байланыс жүйелерінің маңызы артады, өйткені олар жоғары жылдамдықты және жоғары өнімділікті қамтамасыз етудің басты құралы болып табылады [1].

Оптикалық талшықты байланыс (OTN-Optical Transport Network) технологиясы, оның мүмкіндіктері мен артықшылықтары 5G инфрақұрылымының тиімді жұмыс істеуіне үлкен ықпал етеді. Оптикалық талшықтар арқылы ақпараттарды тасымалдау мүмкіндігі тек кең ауқымды желілер үшін ғана емес, сонымен қатар өте жоғары жылдамдықты және сапалы деректерді талап ететін қызметтер үшін де өте маңызды. 5G инфрақұрылымының қолжетімділігі мен өнімділігі оптикалық байланыс жүйелеріне тікелей байланысты болады, себебі олар төменгі кідіріс уақытын, жоғары өткізу қабілетін және тұрақтылықты қамтамасыз ету үшін ең тиімді шешім болып табылады.

Екіншіден, оптикалық байланыс жүйелері кідіріс уақытын төмендетуге, сондай-ақ қашықтыққа байланысты сигналдың жоғалуын азайтуға мүмкіндік береді. Осылайша, 5G желісінің жоғары сенімділігі мен жылдамдығының негізі оптикалық байланыс жүйелерінде жатыр.

Бұл мақалада 5G инфрақұрылымында оптикалық байланысты пайдалану мүмкіндіктері мен артықшылықтары қарастырылады. Мақсат – 5G технологиясының дамуындағы оптикалық байланыс жүйелерінің рөлін түсіну және оларды енгізудің ықтимал артықшылықтарын көрсету. Сонымен

қатар, 5G желілерінің болашағын ескере отырып, оптикалық байланыс жүйелерін пайдалану арқылы осы жаңа технологияның дамуын жеделдету жолдары талқыланады[2].

5G технологиясы жоғары жылдамдықты деректерді беру, төмен кідіріс уақытын, кең ауқымды байланыс мүмкіндіктерін және үлкен сыйымдылықты қамтамасыз ету үшін жасалған. Бұл технологияның ең басты ерекшелігі – үлкен көлемдегі деректерді жылдам тасымалдау мүмкіндігі. 5G желілері осы қажеттіліктерді қанағаттандыру үшін жаңа байланыс әдістері мен архитектураларды талап етеді. 5G желісі, әсіресе, деректерді беру жылдамдығы мен кідіріс уақытын минимизациялауды көздейді, бұл өзінің құрамдас бөлігі ретінде оптикалық байланыс жүйелерін тиімді пайдалануды қажет етеді.

Оптикалық байланыс жүйелері, яғни оптикалық талшықты байланыс, ақпаратты тасымалдау үшін жарық сигналдарын қолданатын технология. Бұл жүйе жоғары өткізу қабілетімен, төменгі кідіріс уақытымен және жоғары сенімділігімен ерекшеленеді. Оптикалық талшықтар арқылы деректер өте жоғары жылдамдықпен, үлкен көлемде тасымалданады. Осы себепті оптикалық байланыс 5G инфрақұрылымында негізгі рөл атқарады. 5G желісінің тиімділігі мен жоғары өнімділігі оптикалық байланыс жүйелерінің көмегімен жүзеге асады, өйткені олар деректерді өте үлкен қашықтыққа тасымалдау кезінде деректердің жоғалуын және кідірісін минимизациялауға мүмкіндік береді.

Жоғары өткізу қабілеті: Оптикалық талшықтар кең ауқымды деректерді жоғары жылдамдықпен тасымалдауға мүмкіндік береді. 5G желісі үшін бұл өте маңызды, себебі үлкен деректер көлемін тиімді өңдеу және тасымалдау талап етіледі.

Төменгі кідіріс уақыты: Оптикалық байланыс жүйелерінің арқасында 5G желісінің кідіріс уақыты минимизацияланады. Бұл әсіресе, нақты уақыт режимінде деректерді беру және қабылдау қажет болатын жағдайларда маңызды.

Қашықтыққа байланысты шектеулердің болмауы: Оптикалық байланыс жүйелері ұзақ қашықтықтарға деректерді жоғалтусыз тасымалдауға мүмкіндік береді. Бұл 5G инфрақұрылымының ауқымын кеңейтуде шешуші рөл атқарады.

Қауіпсіздік: Оптикалық байланыс жүйелері деректерді тасымалдау кезінде олардың жоғалуы мен бұрмалануын болдырмайды. Бұл қауіпсіздік деңгейін арттырады және деректердің тұтастығын қамтамасыз етеді.

5G инфрақұрылымын толық жүзеге асыру үшін оптикалық байланыс жүйелерін тиімді біріктіру қажет. Осы жүйелерді біріктіру кезінде бірнеше

аспектілер ескерілуі тиіс: 5G антенналары мен базалық станцияларын оптикалық байланыс жүйелері арқылы біріктіру, желіаралық байланыс үшін оптикалық талшықтарды қолдану, сондай-ақ жоғары өткізу қабілеті мен сенімділікке ие оптикалық маршрутизаторларды енгізу. Сонымен қатар, 5G инфрақұрылымындағы оптикалық байланыс жүйелерінің интеграциясы мобильді байланыс қызметтерін жақсартуға және қолданушылар үшін жоғары жылдамдықты интернетке қол жеткізу мүмкіндіктерін арттыруға мүмкіндік береді.

Материалдар мен әдістері

5G мобильді байланыс жүйелері телекоммуникация индустриясына жаңалық енгізіп, жоғары деректер жылдамдығы, аз кідіріс және құрылғылар тығыздығы секілді талаптарды алға тартты. Алайда дәстүрлі радиожиілік (RF) жүйелері бұл талаптарды толық орындай алмайды. Сондықтан, 5G инфрақұрылымына қосымша ретінде OWC (Оптикалық Сымсыз Байланыс) технологиясы ұсынылуда [3]. Бұл технология қала, стадион, әуежай, өндіріс секілді орындарда жоғары жылдамдықты байланыс орнатуға қолайлы [4].

Cornel Barbut Румынияда FTTR концепциясы мен талшықты инфрақұрылымның дамуын талдап, оның урбанизацияланған аймақтардағы маңызын көрсетті [5].

2017 жылғы зерттеу оптикалық және радиоқатынас желілерін басқару арқылы 5G жүйесін бөлшектеп басқару әдісін ұсынды. Бұл тәсіл гиперкешенді шеттер мен бұлтты есептеулерге негізделген [6]. Сонымен қатар, 5G инфрақұрылымын біріктірудің экономикалық және техникалық аспектілері зерттелді [7].

FSO (еркін кеңістіктегі оптикалық байланыс) жүйелері 5G+ (Beyond 5G) шеңберінде қарастырылып, жоғары жылдамдық пен қауіпсіздік қамтамасыз етсе де, ауа райы факторларына тәуелді болып қала береді [8].

B5G жүйелері үшін VLC (видимдік жарық байланысы) мен RF технологияларын біріктіру маңызды. Бұл желілер автономды көліктер, IoT және ақылды қалалар сияқты технологияларды қолдауға бағытталған.

Fatemehsadat Tabatabaeimehr және әріптестері AI негізіндегі жүйелер арқылы көп қабатты метрополитен желілерінде ресурстарды тиімді басқару мүмкіндігін ұсынады [9].

Tomás Powell Villena Andrade зерттеуінде VLC және RF бірігуі арқылы энергия тұтынуды азайту және деректерді беру жылдамдығын арттыру көрсетілді.

Ramakrishnan Raman және т.б. B5G желілерінде оптикалық спектрді тиімді пайдалану әдісін ұсынады [10].

Anna Tzanakaki мен әріптестері деректер орталықтары, сымсыз және оптикалық инфрақұрылымдарды біріктіру арқылы сенімді байланысқа қол жеткізуге болатынын атап өтті [11].

Idris Mohammed Garba және басқалар Нигериядағы 5G енгізу тәжірибесін талдап, халықаралық стандарттардың қажеттілігіне тоқталды [12].

Chaoying Li зерттеуінде 5G мм-диапазонды байланыс технологиясының көлік және жол жүйелеріндегі қауіпсіздік пен басқаруға әсері қарастырылады [13].

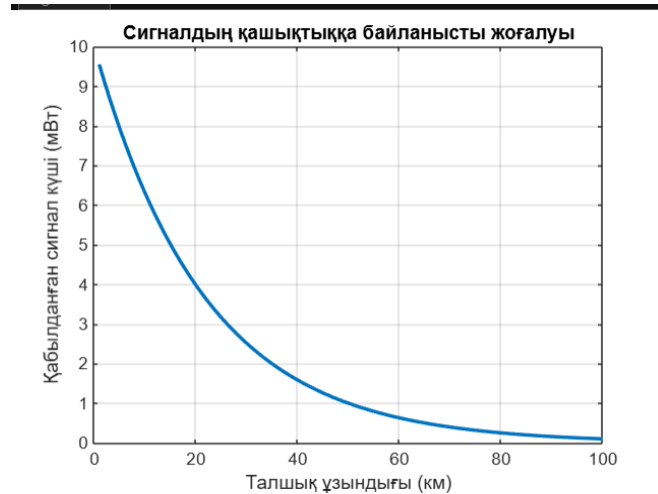
Жалпы, VLC, RF және AI технологияларының синергиясы болашақ жоғары жылдамдықты, сенімді және тиімді байланыс жүйелерін дамытуда маңызды рөл атқарады.

MATLAB ортасында эксперимент және нәтиже

Оптикалық талшықтағы сигналдың жоғалуын зерттеу үшін MATLAB ортасында тәжірибе жүргізілді. Эксперимент барысында талшық ұзындығы 1 км-ден 100 км-ге дейін өзгертіліп, сигналдың жоғалу сипаты бақыланды.

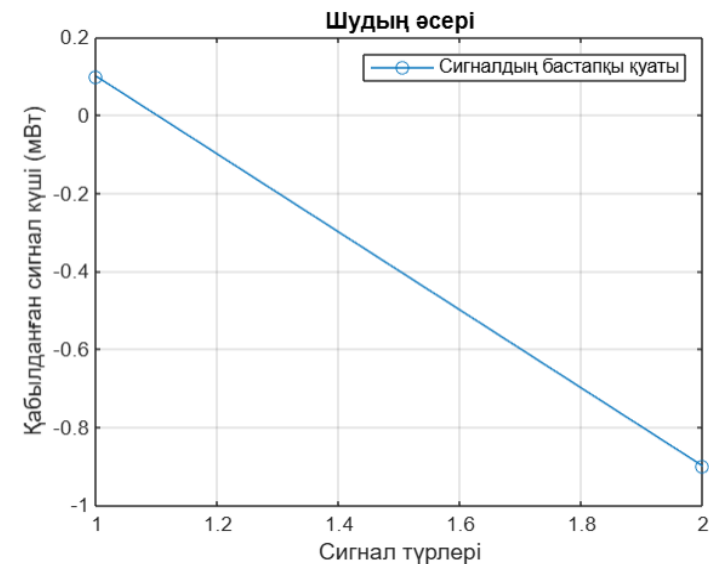
Эксперименттің бастапқы параметрлері төмендегідей болды:

- Талшық ұзындығы: 1 км-ден 100 км-ге дейін,
- Талшықтағы жоғалту: 0.2 дБ/км,
- Модемнің бастапқы шығару қуаты: 10 мВт.



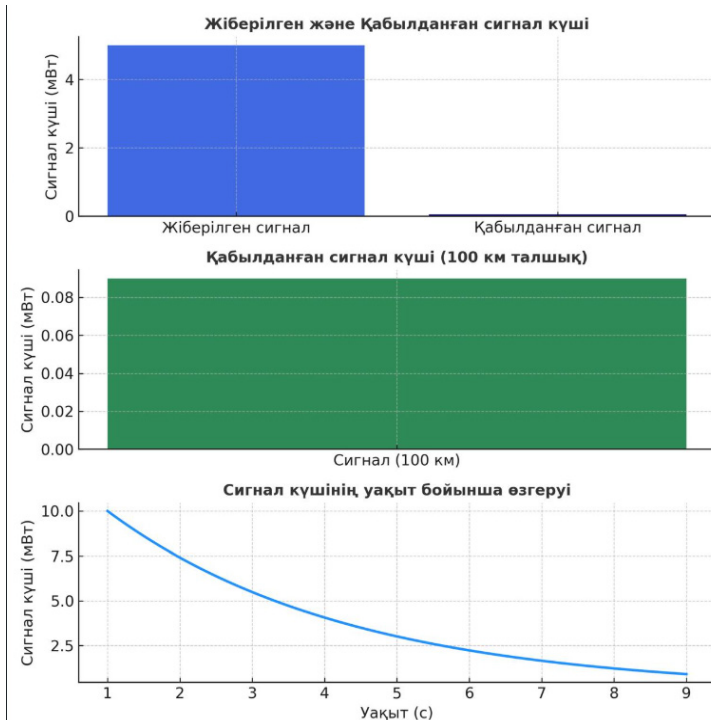
1-сурет – Сигналдың қашықтыққа байланысты жоғалуы

Оптикалық талшықтағы сигналдың шулы ортада қалай өзгеретінін зерттеу үшін қосымша тәжірибе жүргізілді. Бұл тәжірибеде талшық ұзындығы 100 км-ге тең болды, ал шу деңгейі 1 мВт деп алынды. Бастапқы сигналдың қуаты талшықтағы жоғалтуға байланысты төмендеп, кейін оған шудың әсері ескерілді.



2-сурет – Шудың әсері

Талшық арқылы сигналдың берілуінде қашықтықтың әсерін зерттеу үшін тәжірибе жүргізілді. Бұл тәжірибеде талшықтың ұзындығы 100 км, ал жоғалту коэффициенті 0.2 дБ/км деп алынды. Бастапқы модемнің шығару қуаты 10 мВт болды.



3-сурет – Сигналдың оптикалық талшық арқылы таралуы және жоғалуы

5G желісінде қолданылатын оптикалық байланыс жүйесінің параметрлерін ескере отырып, тәжірибе жүргізілді. Бұл тәжірибеде талшықтың ұзындығы 50 км, жоғалту коэффициенті 0.2 дБ/км деп алынды. Модемнің шығару қуаты 10 мВт, ал модемдегі шу деңгейі 0.5 мВт болды.

Нәтижелер және талқылау

Бұл зерттеуде оптикалық талшық арқылы сигналдың жоғалуына әсер ететін факторлар MATLAB ортасында зерттеліп, талшық ұзындығының және жоғалту коэффициентінің сигналдың сапасына әсері жан-жақты талданды. Эксперименттің мақсаты – сигналдың берілуі мен жоғалуы арасындағы байланыс пен ықпал ететін параметрлерді анықтау болды.

Сигналдың жоғалуының талшық ұзындығына тәуелділігі:

Ең алдымен, эксперимент барысында талшықтың ұзындығы 1 км-ден 100 км-ге дейін өзгертілгенде, сигналдың қуатының экспоненциалды түрде төмендейтіні анықталды. Бұл құбылыс оптикалық талшықтардағы энергия

жоғалуын көрсетеді. Сигналдың қуатының төмендеуі талшық ұзындығының артуымен бірге байқалады, бұл оптикалық жүйелерде байланыс сапасын қамтамасыз ету үшін күшейткіштерді қолданудың қажеттілігін айқын дәлелдейді. Эксперименттің негізгі нәтижесі ретінде сигналдың қуатының шұғыл төмендеуі байқалды, бұл жоғары қашықтықтардағы сигналды тарату үшін қосымша күш-жігер мен арнайы техникалық шешімдерді қажет ететінін көрсетеді.

Эксперимент кезінде есептелген сигнал жоғалуының мәндері төмендегі формуламен берілді:

$$P_{signal} = P_{modem} \times 10^{-\alpha L} \quad (1)$$

Мұндағы:

P_{signal} – қабылданған сигнал қуаты (мВт)

P_{modem} – бастапқы шығару қуаты (мВт)

α – талшықтағы жоғалту коэффициенті (дБ/км)

L – талшық ұзындығы (км)

Сигналдың жоғалуының тәжірибелік нәтижелері көрсеткендей, ұзақ қашықтықтарда сигналдың әлсіреуі экспоненциалды түрде байқалады, яғни, бұл жүйелердің тиімділігі мен сенімділігін арттыру үшін күшейткіштерді қолдану қажеттілігін растайды.

Шу Әсерінің Сигнал Қуатына Тәуелділігі:

Екінші эксперимент шу деңгейінің сигналдың қабылданған қуатына қалай әсер ететінін зерттеуге арналған. Талшық ұзындығы 100 км деп алынған жағдайда, шу деңгейінің әсері байқалды. Шу әсері сигналдың қабылданған қуатын төмендететінін және оның сапасына айтарлықтай теріс әсер ететінін көрсетті. Шу мен сигналдың қуатының арасындағы байланыс келесі формуламен анықталды:

$$P_{received} = P_{signal} - P_{noise} \quad (2)$$

Мұндағы:

$P_{received}$ – шу ескерілген қабылданған сигнал қуаты (мВт)

P_{noise} – шудың қуаты (мВт)

2-суретте шу әсерінен қабылданған сигнал қуатының айтарлықтай төмендегені көрінеді. Бұл тәжірибе нәтижесі оптикалық байланыс жүйелерінде шудан қорғау мен сигналды күшейту үшін арнайы әдістер мен

технологияларды қолданудың маңыздылығын көрсетеді. Шу деңгейін азайту және сигналды күшейту әдістері сигнал сапасын жоғарылатып, жүйенің сенімділігін арттыруға мүмкіндік береді.

Сигнал Жоғалуының Қашықтыққа Тәуелділігі:

Талшық арқылы сигналдың берілуіндегі қашықтықтың әсері де зерттелді. Эксперимент нәтижелері бойынша сигналдың қуатының қашықтыққа байланысты төмендейтіні айқын көрінді. Бұл талшық арқылы сигналдың берілуі кезінде энергияның жоғалуы мен қашықтықтың артуына байланысты мәліметтердің жоғалуын көрсетеді. Бұл нәтижелер талшықтың ұзындығы мен жоғалту коэффициентінің байланысты болатынын, және олардың жүйенің тиімділігіне үлкен әсер ететінін дәлелдейді.

3-суретте талшық бойымен сигналдың әлсіреуінің графикалық бейнесі берілген. Бұл графиктен сигналдың қабылданған қуатының қашықтыққа қарай төмендейтінін анық байқауға болады, және ол талшық ұзындығының өсуіне байланысты қатаң түрде әлсірейді. Бұл нәтижелерді ескере отырып, ұзақ қашықтықтарға сигналды тиімді жеткізу үшін күшейткіштер мен сигналды қорғау шараларының маңыздылығы айқындала түседі.

5G желісінде қолданылатын оптикалық байланыс жүйесінің параметрлерін зерттеу мақсатында жүргізілген тәжірибеде талшықтың ұзындығы 50 км, жоғалту коэффициенті 0.2 дБ/км және модемнің шығару қуаты 10 мВт болды. Модемдегі шу деңгейі 0.5 мВт деп алынды. Нәтижелер көрсеткендей, 5G жүйесіндегі оптикалық байланыс жүйесінде ұзақ қашықтықтарда сигналдың қуаты айтарлықтай төмендеді. Сонымен қатар, шу деңгейі де сигнал сапасына теріс әсер ететінін көрсетті. Осылайша, зерттеу нәтижелері 5G жүйелерінде сигналды қорғау және күшейту әдістерін қолдану қажеттілігін растайды.

Зерттеу нәтижелері оптикалық талшық арқылы сигналдың берілуіндегі жоғалуды, қашықтықтың әсерін және шу деңгейінің маңыздылығын көрсетті. Талшық ұзындығының өсуі мен шу деңгейінің артуы сигналдың сапасына айтарлықтай теріс әсер етеді. Сондықтан ұзақ қашықтықтарға сигналды тиімді жеткізу үшін күшейткіштер мен шудан қорғау әдістерін қолдану өте маңызды. Бұл зерттеу нәтижелері оптикалық байланыс жүйелерін жобалау мен 5G желілерінде қолданылатын байланыс инфрақұрылымын жақсарту үшін негіз бола алады.

Қорытынды

Бұл жұмыста 5G байланыс жүйелеріндегі оптикалық талшық арқылы сигналдың таралу ерекшеліктері зерттелді. Эксперименттер арқылы талшық ұзындығының, жоғалту коэффициентінің, шу деңгейінің және модем қуатының қабылданған сигнал сапасына қалай әсер ететіні қарастырылды.

Алдымен, оптикалық талшықтың ұзындығы артқан сайын сигнал қуатының экспоненциалды түрде төмендейтіні анықталды. Өртүрлі жағдайларда (талшық ұзындығы 1 км-ден 100 км-ге дейін) сигнал күші графиктері салынды. Талшықтың жоғалту коэффициенті 0.2 дБ/км болғанда да, үлкен қашықтықтарда сигналдың айтарлықтай әлсірейтіні байқалды. Бұл нәтиже теориялық тұрғыдан белгілі болғанымен, тәжірибелік модельдеу арқылы оның нақты көрсеткіштері нақтыланды.

Сигнал мен шу арасындағы қатынас (SNR) факторына да ерекше назар аударылды. Шудың болуы қабылданған сигналдың сапасына үлкен әсер етеді. Шу деңгейі жоғары болған сайын қабылданған сигнал күші азаяды және байланыс сапасы нашарлайды. Эксперименттерде шу деңгейінің (мысалы, 0.5 мВт) сигналға әсері нақты есептелді және график түрінде көрсетілді.

Сонымен бірге сигналдың уақыт бойынша азаюы да модельденді. Мұнда талшықтағы жоғалту факторын ескере отырып, сигналдың уақытқа тәуелді экспоненциалды әлсіреуі бақыланды. Бұл әсіресе ұзақ уақыт бойы тұрақты сапалы байланыс қамтамасыз етуде маңызды. Графиктер арқылы сигналдың уақыт ішінде біртіндеп әлсірейтіні дәлелденді.

Бұдан бөлек, модемнің бастапқы қуаты мен қабылданған сигнал қуаты салыстырылды. Бастапқы қуат (5 мВт, 10 мВт сияқты) белгілі бір қашықтық өткеннен кейін қатты төмендейтіні байқалды. Бұл да оптикалық байланыс желілерінің жобалау кезеңінде өте маңызды параметр екенін көрсетті.

Жалпы зерттеу нәтижелері төмендегідей негізгі қорытындылар жасауға мүмкіндік береді:

Оптикалық талшық арқылы берілетін сигналдың әлсіреуі негізінен жоғалту коэффициентіне және қашықтыққа байланысты. Шу деңгейінің артуы қабылданған сигнал сапасын едәуір нашарлатады, сондықтан байланыс жүйелерінде шуға қарсы шаралар қолдану қажет. Модемнің бастапқы қуаты жоғары болғанымен, ұзақ қашықтықтарда сигналды күшейту құрылғылары қолданылмаса, сигнал сапасы төмендейді. Уақыт өте келе сигнал әлсіреуі де маңызды фактор, әсіресе ұзақ мерзімді тұрақты байланыстар үшін. 5G сияқты жоғары жылдамдықты және төмен кідірісті байланыс жүйелері үшін оптикалық желілердің параметрлерін мұқият есептеу, жоғалтуларды азайту, қажет жерде күшейткіштер орнату өте маңызды. Алынған нәтижелер болашақта 5G және басқа заманауи байланыс желілерін тиімді жобалауға және оңтайландыруға негіз бола алады.

Пайдаланылған деректер тізімі

1 «Optical network problems in 5G Radio Access Networks» Péter János Varga, Dávid Óhegyi, Sándor Gyányi, Tibor Wüthl SACI 2023 • IEEE 17th International Symposium on Applied Computational Intelligence and Informatics • May 23-26, 2023 • Timișoara, Romania – <https://doi.org/10.1109/SACI58269.2023.10158626>

2 «Fiber Optic Deployments in Romania between Metropolitan Fiber Optic Networks and Indoor Fiber Optic Infrastructure» Cornel Barbut AFOR - Association of Fiber Optic from Romania Bucharest, Romania cornel.barbut@afor.ro, ECAI 2018 - International Conference – 10th Edition Electronics, Computers and Artificial Intelligence 28 June -30 June, 2018, Iasi, ROMÂNIA – <https://doi.org/10.1109/ECAI.2018.8679021>

3 «Integration of Optical Wireless Communication with 5G Systems» IEEE GLOBECOM Workshop on Optical Wireless Communications (OWC), Taipei, Taiwan, 7-11 December 2020 Taner Metin , Marc Emmelmann , Marius Corici , Volker Jungnickel , Christoph Kottke , Marcel Müller DOI: 10.1109/GCWkshps50303.2020.9367502. URL: <https://www.eliot-h2020.eu/integration-of-optical-wireless-communication-with-5g-systems/>

4 «Latency Analysis for 5G Optical Transport Network» Stela Kostadinova, Valentina Markova, Nikolay Kostov, Ivelina Balabanova, Georgi Georgiev. 2021 International Conference on Biomedical Innovations and Applications (BIA) | 978-1-6654-4581-8/22/\$31.00©2022 IEEE | – <https://doi.org/10.1109/BIA52594.2022.9831249>

5 «An optical and radio access network resource management scheme based on hierarchical edge cloud and baseband function split for 5G network slicing» Wei Liu¹, Min Zhang^{1*}, Chuang Song¹, Yueying Zhan², Danshi Wang¹, Shanyi Guo¹, Lin Zhang¹, Xue Chen¹ State Key Laboratory of Information Photonics and Optical Communications, Beijing University of Posts and Telecommunications (BUPT), Beijing, 100876, China, 2017 – <https://doi.org/10.1364/ACPC.2017.Su2A.62>

6 «Revolutionizing Free-Space Optics: A Survey of Enabling Technologies, Challenges, Trends, and Prospects of Beyond 5G Free-Space Optical (FSO) Communication Systems» Isiaka A. Alimi^{1,*} and Paulo P. Monteiro¹, 2024 by the authors. Licensee MDPI, Basel, Switzerland. This article is an open access article distributed under the terms and conditions of the Creative Commons Attribution (CC BY) license (<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>) – <https://doi.org/10.3390/s24248036>

7 «Techno-Economic Analysis of Deployment Options for Converged 5G Wireless-Optical Access Networks» Maurice Bongard, Kai Grunert and Slavisa Aleksic MIPRO 2020, September 28 - October 02, 2020, Opatija, Croatia – <https://doi.org/10.23919/MIPRO48935.2020.9245174>

8 «Trusted distributed marketplace for virtual passive optical network sharing» Nima Afraz, ANDMarcoRuffini Vol. 14, No. 5 / May 2022 / Journal of Optical Communications and Networking

9 «Supporting Beyond 5G Applications by Coordinating AI-based Intent Operation. An Example for Multilayer Metro Networks» Fatemehsadat Tabatabaeimehr, Marc Ruiz and Luis Velasco 2020 European Conference on Optical Communications (ECOC) | 978-1-7281-7361-0/20/\$31.00 ©2020 IEEE | – <https://doi.org/10.1109/ECOC48923.2020.9333357>

10 «A 5G MmWave Communication Framework in Vehicle-road Cooperative System» Chaoying Li, Yuanfei Fang, Liangjie Yu, Chaozhe Han 2022 8th Annual International Conference on Network and Information Systems for Computers (ICNISC) 978-1-6654-5351-6/22/\$31.00 ©2022 IEEE | – <https://doi.org/10.1109/ICNISC57059.2022.00019>

11 «A New Method of Optical Spectrum Analysis for Advanced Wireless Communications» Dr. Ramakrishnan Raman, Rotash kumar, Mr. Sachin Ghai, Anita Gehlot, Dr. Adusupalle Muni Raju, DR. AMIT BARVE, 2023 3rd International Conference on Advance Computing and Innovative Technologies in Engineering (ICACITE) 979-8-3503-9926-4/23/\$31.00 ©2023 IEEE | – <https://doi.org/10.1109/ICACITE57410.2023.10182414>

12 «Demonstration of a Hybrid B5G System Integrating VLC and RF-Based Technologies with Access Networks» Tomás Powell Villena Andrade *, Celso Henrique de Souza Lopes Arismar Cerqueira Sodré Junior © 2025 by the authors. Licensee MDPI, Basel, Switzerland. This article is an open access article distributed under the terms and conditions of the Creative Commons Attribution (CC BY) license (<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>) – <https://doi.org/10.3390/app15020955>

13 «Converged Optical, Wireless, and Data Center Network Infrastructures for 5G Services» Anna Tzanakaki, Markos P. Anastasopoulos, and Dimitra Simeonidou Vol. 11. – № 2. – February, 2019/J. OPT. COMMUN. NETW. A111 – <https://doi.org/10.1364/JOCN.11.00A111>

15.05.25 ж. баспаға түсті.

17.12.25 ж. түзетулерімен түсті.

27.02.26 ж. басып шығаруға қабылданды.

А. Нусіпәлі¹, *К. Н. Тайсариева², Н. Смайлов³, Ж. К. Аяпберген⁴

^{1,2,3,4}Қазақстан Республикасының Ұлттық техникалық университеті
имени К. И. Сатпаева,

Республика Казахстан, город Алматы.

Поступило в редакцию 15.05.25.

Поступило с исправлениями 17.12.25.

Принято в печать 27.02.26.

ВОЗМОЖНОСТИ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ ОПТИЧЕСКОЙ СВЯЗИ В ИНФРАСТРУКТУРЕ 5G

В данной научной статье рассматриваются возможности применения оптической связи в инфраструктуре сетей 5G. Сети мобильной связи пятого поколения обеспечивают высокую скорость передачи данных, низкую задержку и большую пропускную способность. Однако для полноценной реализации этих требований важную роль играет мощность и эффективность инфраструктуры. Оптические системы связи, обладая высокой пропускной способностью и надежностью, способны решить указанные задачи. В статье рассматриваются технологии передачи данных по оптоволоконным линиям, их интеграция в сеть 5G, а также преимущества и перспективы использования оптической связи. Развитие оптических технологий связи с целью обеспечения высокой пропускной способности и минимальной задержки способствует созданию более эффективной и устойчивой инфраструктуры 5G. Кроме того, в статье приводятся сведения о существующих решениях в области оптической связи и тенденциях их развития в будущем.

Ключевые слова: Инфраструктура 5G, оптическая связь, высокоскоростной интернет, оптическое волокно, технологии 5G, системы связи, сетевая архитектура, технологии информационных коммуникаций.

A. Nussipali¹, *K. N. Taissariyeva², N. Smailov³, Z. K. Ayapbergen⁴

^{1,2,3,4}K. Satpayev Kazakh National Research Technical University,
Republic of Kazakhstan, Almaty.

Received 15.05.25.

Received in revised form 17.12.25.

Accepted for publication 27.02.26.

THE POSSIBILITIES OF USING OPTICAL COMMUNICATION IN THE 5G INFRASTRUCTURE

This scientific paper discusses the potential application of optical communication in the infrastructure of 5G networks. Fifth-generation mobile communication networks provide high data transmission speeds, low latency, and high capacity. However, to fully meet these requirements, the power and efficiency of the infrastructure play a crucial role. Optical communication systems, with their high capacity and reliability, can solve these challenges. The paper explores fiber-optic data transmission technologies, their integration into the 5G network, as well as the advantages and prospects of optical communication. The development of optical communication technologies aimed at ensuring high capacity and minimal latency helps to create a more efficient and resilient 5G infrastructure. Additionally, the paper provides information about existing optical communication solutions and trends in their future development.

Keywords: 5G infrastructure, optical communications, high-speed Internet, optical fiber, 5G technologies, communication systems, network architecture, information communication technologies.

МРНТИ 44.01.05

<https://doi.org/10.48081/BGQF1959>

**Н. Т. Рустамов¹, *О. Д. Меурбекова²,
А. Н. Бергузинов³, А. Г. Калтаев⁴**

^{1,2}Международный казахско-турецкий университет
имени Ходжи Ахмеда Ясави,

Республика Казахстан, г. Туркестан;

^{3,4}Торайғыров университет,

Республика Казахстан, г. Павлодар.

¹ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-6437-6600>

²ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-0949-1443>

³ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-6954-8259>

⁴ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-1684-3347>

*e-mail: oksana_120183@mail.ru

ГИБРИДНАЯ РАСПРЕДЕЛЕННАЯ ГЕНЕРАЦИЯ, РАБОТАЮЩАЯ НА БИОТОПЛИВЕ

В процессе эксплуатации энергостанций распределённой генерации (РГ) возникает одна из ключевых проблем – обеспечение стабильного и бесперебойного электроснабжения потребителей. Особенно это актуально для гибридных систем РГ, работающих на основе возобновляемых источников энергии, таких как солнечная и ветровая энергия, чья выработка напрямую зависит от погодных условий и времени суток. Традиционно данная проблема решалась использованием резервных дизельных или бензиновых генераторов, которые автоматически подключались при снижении мощности основных источников. Однако такие решения приводят к значительному увеличению себестоимости электроэнергии и росту выбросов вредных веществ в атмосферу.

Предлагаемое в работе решение направлено на создание автономной и экологически устойчивой энергосистемы. Для этого в качестве топлива предлагается использовать биогаз, получаемый из сельскохозяйственных и животноводческих отходов. Такой подход не только снижает эксплуатационные затраты, но и способствует переработке отходов, улучшая экологическую обстановку. В качестве генерирующего оборудования применяется газотурбинный генератор

(ГТГ), который способен работать в когенеративном режиме — то есть одновременно производить электрическую и тепловую энергию. Это особенно важно для удалённых и труднодоступных регионов, где помимо электроэнергии требуется также теплоснабжение. Таким образом, использование ГТГ на биотопливе обеспечивает повышение энергоэффективности, снижение себестоимости электроэнергии и уменьшение зависимости от внешних энергетических ресурсов.

Ключевые слова: распределённая генерация, режим когенеративности, эффективность работы ГРГ, биотопливо, биогаз.

Введение

Как известно, сегодня автономные энергетические системы, вырабатывающие электрическую энергию и находящиеся в эксплуатации на рынке, ориентированы на строго определённый регион. В этом случае такие системы в определённой степени теряют универсальность. С другой стороны, такие системы в значительной степени зависят от погодных условий. Для устранения этой зависимости применяются дополнительные установки генерации электрической энергии. Например, дизельные электростанции (ДЭС) [1]. Такой подход к устранению зависимости от погодных условий приводит к удорожанию себестоимости вырабатываемой электроэнергии данными РГ. Самое главное, использование таких РГ в удалённых регионах не обеспечивает возможности расширения их функциональности и работы в когенеративном режиме. Очевидно, что появление новых гибридных РГ требует систематизации существующих решений. Разработка новых гибридных РГ, работающих в когенеративном режиме и обеспечивающих выработку электроэнергии с низкой себестоимостью, сегодня является востребованной.

Целью работы является проектирование гибридной распределённой генерации (ГРГ), не зависящей от капризов погоды, работающей в когенеративном режиме и обеспечивающей стабильную выработку электрической энергии с низкой себестоимостью [2].

Материалы и методы

Сочетание гарантированного источника энергии – ДЭС и РГ – позволяет построить универсальные энергокомплексы с удовлетворительными технико-экономическими характеристиками. По данной технологии можно в определённой степени проектировать надёжные РГ для различных децентрализованных объектов. Однако при этом не только себестоимость

выработанной электрической энергии остаётся высокой, но и не обеспечивается работа РГ в режиме когенерации.

Такой вариант энергетического комплекса, хотя и включает два источника энергии, в определённом смысле позволяет устранить зависимость от погодных условий [3]. Сокращение времени работы дизельной части энергокомплекса обеспечивает значительную экономию дизельного топлива, однако именно эта составляющая повышает себестоимость выработанной электрической энергии.

Обобщённая схема гибридной системы электроснабжения рассматриваемого типа приведена на рисунке 1 [4].

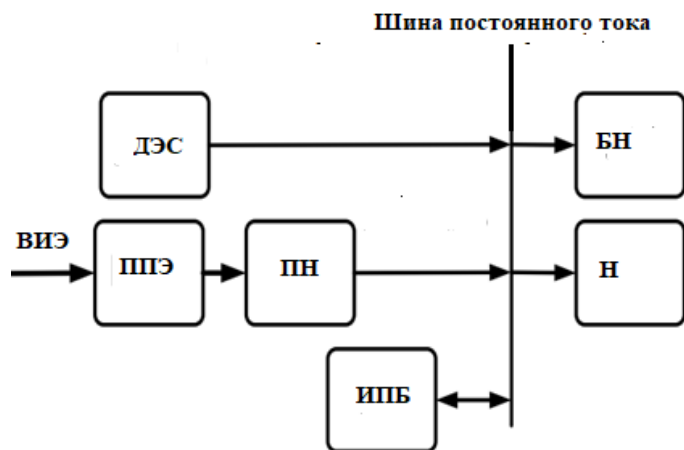


Рисунок 1 – Гибридная распределенная генерация с дублирующей ДЭС: ДЭС – дизельная электростанция; ППЭ – преобразователь первичного энергоресурса; ПН – преобразователь напряжения; ИБП – источник бесперебойного питания; Н – нагрузка; БН – балластная нагрузка.

Представленная схема гибридного энергетического комплекса предусматривает объединение различных источников электроэнергии на шине постоянного тока. При этом себестоимость вырабатываемой электрической энергии системой РГ увеличивается за счёт расхода дизельного топлива. С другой стороны, необходимо учитывать ограниченность данного ресурса.

Если в систему, показанную на рисунке 1, вместо ДЭС подключить газотурбинный генератор (ГТГ), работающий на биогазе, то появляется возможность снизить себестоимость производимой системой электрической энергии, а также дополнительно вырабатывать тепловую энергию. Такой

вариант уже можно рассматривать как когенеративный режим [5]. Если учесть, что биогаз вырабатывается из сельскохозяйственных и животноводческих отходов, то данный вид топлива обладает возобновляемыми свойствами. Это положение можно подтвердить расчётами.

Как известно, энергетический потенциал биомассы зависит от утилизации отходов сельскохозяйственного, животноводческого и растениеводческого производства. При этом можно получить не только биогаз для энергетических целей, но и биогумус, необходимый для тепличных хозяйств. В сельском хозяйстве Казахстана годовой объём органических отходов составляет около 40 миллионов тонн. Переработка этих отходов по биогазовым технологиям позволит получить около 18 миллиардов кубометров биогаза, что эквивалентно 14–15 млн тонн условного топлива, или 12,4 млн тонн мазута. Кроме того, образуется приблизительно 25–30 миллионов тонн гумуса [6; 7].

Пример расчёта экономической ценности биогаза и гумуса. Биогаз с содержанием метана 60% обладает энергетической ценностью около 6 кВт·ч/м³ или 21,6 МДж тепла на 1 м³.

Выход энергии при сжигании 1 л мазута составляет ≈10 кВт·ч. Если принять цену мазута 211,5 тг/л, то стоимость энергии будет составлять ≈21,15 тг/кВт·ч.

При использовании биогаза в термических целях (КПД = 90%) его стоимость:

$$6 \times 0,9 \times 21,15 = 114,21 \text{ тг/м}^3$$

При использовании биогаза в генераторах комбинированной выработки тепловой и электрической энергии (предпосылки: электрический КПД = 35%, тариф за подачу в сеть = 54,05 тг/кВт·ч, бонус за ВИЭ = 28,2 тг/кВт·ч): электроэнергия:

$$6 \times 0,35 \times (54,05 + 28,2) = 172,7 \text{ тг/м}^3$$

тепло (КПД = 50%):

$$6 \times 0,50 \times 21,15 = 63,45 \text{ тг/м}^3$$

Итого (электроэнергия + тепло) ≈ 236,2 тг/м³ биогаза.

Кроме того, переработка отходов даёт сухой гумус, который реализуется на рынке: кора-фракция (0–2 см, мешок) – около 2400 тг, сухой гумус в фасовке по 25 кг – около 300 тг/кг. Таким образом, биогазовые технологии обеспечивают не только выработку дешёвой энергии, но и дополнительную экономическую выгоду за счёт производства гумуса.

На основе выше проведённых расчётов спроектирована общая блок-схема установки получения биогаза (рисунок 2) [8; 9].

В настоящее время на рынке представлено множество установок для производства биогаза, которые преимущественно используются для бытовых и коммунальных нужд. В данной работе предлагается использовать биогаз в качестве топлива для ГТГ.

Предлагаемая установка функционирует следующим образом. Биогаз вырабатывается в результате брожения биоотходов. Последние через приёмник отходов поступают в биореактор, где происходит процесс анаэробного сбраживания. Образующийся биогаз с помощью мешалки доводится до необходимого состояния, после чего проходит стадию фильтрации и с помощью вакуумного насоса подаётся в газгольдер для хранения.

Оставшийся после сбраживания продукт, называемый органическим гумусом, направляется в приёмник гумуса. Полученный гумус является ценным почвоулучшающим материалом и может эффективно применяться в тепличных хозяйствах.

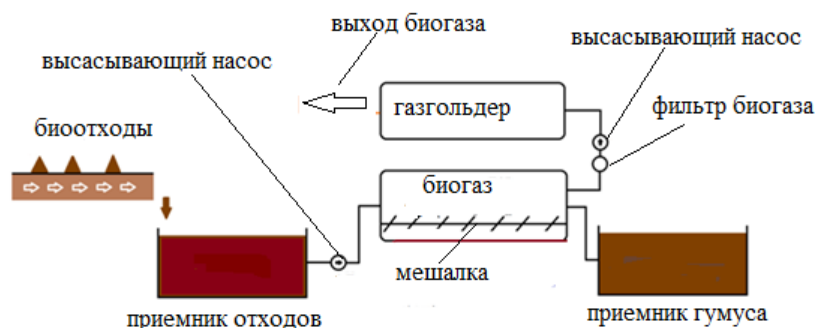


Рисунок 2 – Общая схема устройства получения биогаза.

Оценка себестоимости вырабатываемого биогаза

Биогаз является альтернативой природному газу и может быть использован для получения тепловой и электрической энергии [10; 11]. В дальнейшем под Q_M будем понимать массу исходного органического сырья (отхода).

Результаты и обсуждение

Исходные данные для расчётов: перерабатывается 10 т/сут коровьего навоза (10 000 кг/сут); плотность навоза принята равной $550 \text{ кг} \cdot \text{м}^{-3}$; температура мезофильного процесса анаэробного сбраживания – 32°C .

Предельный объём метана на единицу органического вещества принят как $V_0=0,3 \text{ м}^3/\text{кг}$. Время удерживания $\Theta=1$; коэффициент загрузки реактора $k_z=0,9$. Для расчёта общего объёма биогаза принята доля метана в газовой смеси $\text{CH}_4=70\%$. Низшая теплотворная способность биогаза в примере – $\text{LHV}=23 \text{ МДж}/\text{м}^3$ (около $6\text{--}6,4 \text{ кВт} \cdot \text{ч}/\text{м}^3$ в зависимости от состава).

Суточный объём биомассы в реакторе при заданной плотности составляет $W_b \approx 10000/550 \approx 18,18 \text{ м}^3/\text{сут}$. При доле сухого вещества $11,5\%$ суточный выход сухих веществ оценивается как $G_{\text{сх}} \approx 1150 \text{ кг}/\text{сут}$. С использованием эмпирических зависимостей была получена оценка концентрации органического вещества $S_0 \approx 4,34$ и кинетических коэффициентов $\mu \approx 0,287 \text{ сут}^{-1}$.

Минимальный объём реактора, обеспечивающий нужное время удерживания, равен $V_{\text{min}} \approx W_b \cdot \Theta \approx 216 \text{ м}^3$. По принятой кинетической модели был получен суточный выход метана $\text{LCH}_4 \approx 14,4 \text{ м}^3/\text{сут}$, что соответствует общему суточному объёму биогаза $\text{ЛБГ} \approx 20,57 \text{ м}^3/\text{сут}$ при 70% -м содержании метана. Тепловая энергия от сжигания этого объёма биогаза оценивается в $Q_{\text{сут}} \approx 473 \text{ МДж}/\text{сут} (\approx 131,4 \text{ кВт}/\text{сут})$.

Сопоставление с расчётом «на 1 тонну навоза» при сценарии высокого выхода ($60 \text{ м}^3/\text{т}$) даёт: из 1 т навоза может быть получено до 60 м^3 биогаза ($\approx 360 \text{ кВт} \cdot \text{ч}$ общей теплоты, при принятой $6 \text{ кВт} \cdot \text{ч}/\text{м}^3$); из этих $360 \text{ кВт} \cdot \text{ч} \approx 126 \text{ кВт} \cdot \text{ч} (\approx 35\%)$ потенциально являются электричеством в когенерации, и $\approx 162 \text{ кВт} \cdot \text{ч} (\approx 45\%)$ – теплом. Объём образующегося гумуса после компостирования и доочистки оценивается в диапазоне $\sim 150\text{--}300 \text{ кг}/\text{т}$ (в зависимости от исходного TS и технологических потерь) [12].

Экономическая оценка (ориентировочная): с учётом тарифной структуры (био/подключение/бонусы) энергетическая составляющая на 1 т даёт порядка нескольких тысяч тенге (электроэнергия + тепло), тогда как реализация гумуса (при цене $\sim 90 \text{ тг}/\text{кг}$) даёт заметный дополнительный доход/экономии на удобрениях – в сумме итоговая ресурсно-стоимостная оценка для сценария $60 \text{ м}^3/\text{т}$ составляет $\approx 18\text{--}31 \text{ тыс. тг}/\text{т}$ (интервал зависит от цены гумуса и используемых тарифов) [13].

Зависимости и практическая интерпретация. Основными факторами, влияющими на выход и экономику, являются: содержание сухих веществ (TS), время удерживания Θ , температура (т.е. режим ферментации-мезофильный и термофильный), соотношение субстратов при ко-ферментации и локальные тарифы на электроэнергию и тепло. Ко-ферментация навоза с пищевыми/силосными отходами может существенно повысить выход биогаза на тонну. Внедрение газотурбинных когенерационных установок целесообразно там,

где есть потребность в тепле (тепличные хозяйства, животноводческие комплексы) и достаточный поток сырья.



Рисунок 3 – Суточный выход биогаза (м³/сут) и соответствующая тепловая энергия (кВт·ч/сут) при переработке 10 т/сут навоза.

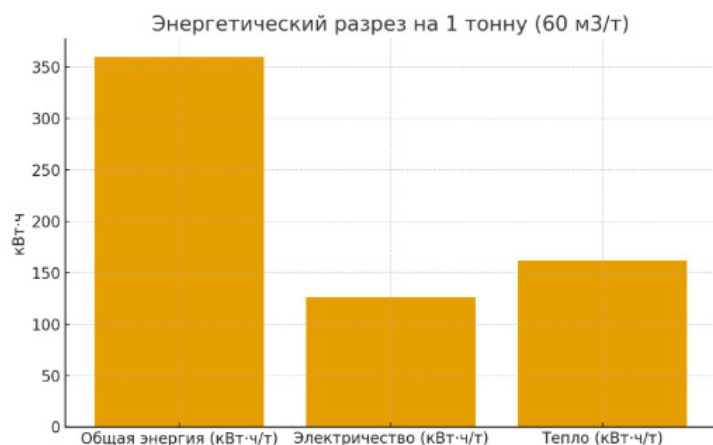


Рисунок 4 – Энергетический разрез на 1 тонну навоза при сценарии высокого выхода (60 м³/т): общая энергия (кВт·ч/т), доля электричества (кВт·ч/т), доля тепла (кВт·ч/т).

Энергетический результат: В результате мезофильного анаэробного сбраживания рогатого навоза в количестве 10 т/сут может быть получено до 473 МДж тепла в сутки. Эта тепловая энергия может быть использована для отопления производственных и административных помещений сельскохозяйственного предприятия в холодные периоды года [14].

Кроме того, образуется значительный объём биогаза с содержанием метана около 60 %, который может быть направлен на работу газотурбинного генератора. При электрическом КПД 35% данный объём биогаза способен обеспечить производство 46–50 кВт·ч электроэнергии в сутки, что является существенным подспорьем для энергообеспечения автономных хозяйств.

Аграрный результат: Побочным продуктом переработки является органический гумус, обладающий высокой агрономической ценностью. Его применение в тепличных хозяйствах способствует повышению урожайности и снижению затрат на минеральные удобрения.

Таким образом, внедрение установки мезофильного анаэробного сбраживания позволяет не только повысить энергетическую независимость сельскохозяйственного предприятия, но и создать замкнутый цикл переработки органических отходов с получением как энергетических, так и аграрных ресурсов.

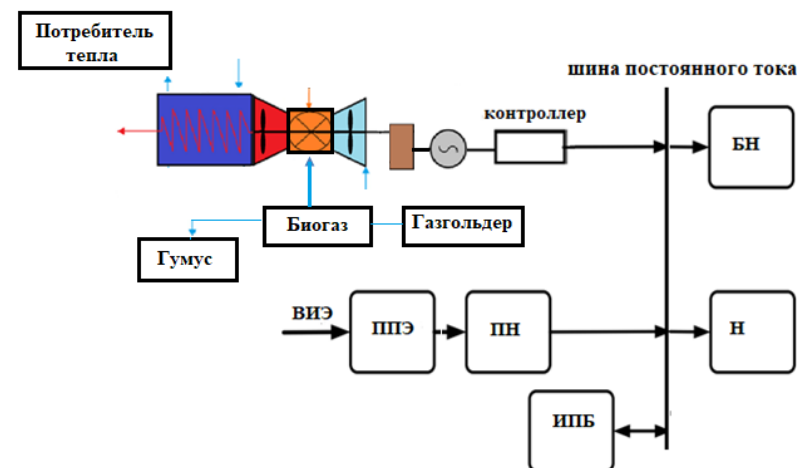


Рисунок 5 – БРГ, работающая в режиме когенеративности

Предложенная в работе БРГ не только способствует поддержанию непрерывности выработки электрической энергии в системе РГ, но и

обеспечивает электрической энергией в микросети вне зависимости от капризов погоды. Предложенная гибридная РГ работающая в режиме когенерации в составе системы РГ запатентована [15].

Опыт показал, что 1 м³ биогаза содержит приблизительно $\approx 5,5$ кВт·ч ($\approx 19,8$ МДж) энергии; соответственно 60 м³/т дают ≈ 330 кВт·ч/т ($\approx 1\,188$ МДж/т $\approx 283,8 \times 10^3$ ккал).

На основе этих графиков вычислена энергетическая и материальная ценность 1 т навоза КРС (при высоком выходе биогаза):

Биогаз: 60 м³/т $\rightarrow \approx 330$ кВт·ч/т; при работе когенератора распределение энергии: электроэнергия $\approx 35\%$ ($\approx 115,5$ кВт·ч/т), тепло $\approx 45\%$ ($\approx 148,5$ кВт·ч/т).

Гумус: после переработки образуется $\approx 150\text{--}300$ кг/т.

Экономическая оценка (Казахстан, 2025):

Электроэнергия: $115,5 \text{ кВт} \cdot \text{ч} \times 32,23 \text{ тт/кВт} \cdot \text{ч} \approx 3\,724 \text{ тт}$.

Тепло: $148,5 \text{ кВт} \cdot \text{ч} \times 4,51 \text{ тт/кВт} \cdot \text{ч} \approx 670 \text{ тт}$.

Гумус: при цене ≈ 90 тт/кг $\rightarrow 13\,500\text{--}27\,000$ тт/т.

Итог: ресурсная ценность $\approx 17,9\text{--}31,4$ тыс. тт/т (включая гумус). Наибольший вклад даёт реализация гумуса; энергетическая составляющая – дополнительный доход и обеспеченность электро- и теплоснабжения.

Выводы

В работе рассмотрена концепция ГРГ, работающей в когенеративном режиме с использованием биогаза, получаемого из отходов животноводства и сельского хозяйства. Показано, что сочетание возобновляемых источников энергии с газотурбинными генераторами на биогазе позволяет повысить энергетическую эффективность и надёжность автономных энергокомплексов.

Установлено, что из 1 тонны навоза крупного рогатого скота при мезофильном анаэробном сбраживании можно получить до 60 м³ биогаза, что эквивалентно ≈ 330 кВт·ч энергии. При работе в когенерационном режиме распределение энергии составляет:

электроэнергия – $\approx 115,5$ кВт·ч (35 %);

тепловая энергия – $\approx 148,5$ кВт·ч (45 %).

Дополнительно при переработке 1 тонны навоза образуется 150–300 кг органического гумуса, который является ценным удобрением для тепличных хозяйств. Таким образом, наибольшую экономическую выгоду обеспечивает не только энергетический, но и аграрный компонент переработки.

Экономическая оценка показала, что совокупная ресурсная ценность 1 тонны навоза КРС составляет $\approx 18\text{--}31$ тыс. тенге (в ценах Казахстана, 2025 г.). Наибольший вклад формируется за счёт гумуса, при этом биогаз обеспечивает дополнительный энергетический эффект и возможность покрытия части потребности в электроэнергии и тепле.

Предложенная гибридная система электроснабжения на основе когенерации с биогазом может быть рекомендована для применения в сельскохозяйственных регионах Казахстана как перспективное направление снижения энергетической зависимости и повышения экологической устойчивости агропромышленного комплекса.

Список использованных источников

1 Альтернативные источники сырья и топлива: тезисы докладов конференции АИСТ–2017, 30 мая–1 июня 2017 г., Минск. – Минск : Институт химии новых материалов НАН Беларуси, 2017. – 79 с.

2 **Арефьев, С. Н.** Опыт концессии биотопливной котельной // Новости теплоснабжения. – 2015. – № 10(182). – С.28–29.

3 **Афонина, Е. О.** Методы подготовки биогаза перед его подмешиванием в сеть природного газа // Актуальные проблемы энергетики АПК: материалы IX междунар. науч.-практич. конф. – Саратов : ЦеСАин, 2018. – С. 8.

4 **Андышева, М. С.** Биогаз - альтернативный источник энергии // Вестн. НГИЭИ. Сер. Техн. науки. – 2014. – Вып.6(37). – С. 22–26.

5 **Баторшин, В. А., Котлер, В. Р.** Зарубежный опыт использования биомассы в качестве топлива для энергетических котлов // Энергетика за рубежом. – 2016. – № 6. – С. 25–35.

6 **Бессмертных, А. В., Зайченко, В. М., Майков, И. Л.** О классификации используемых в электроэнергетике видов биомассы // Пром. энергетика. – 2013. – № 4. – С. 54–57.

7 **Хужакулов, А.Ф., Тиллоев, Л.И., Махмудов, М.Ж. и др.** Биогазовые энергетические установки для фермерских хозяйств. Анализ процессов, влияющих на эффективность их использования // Молодой ученый. – 2013. – № 2(49). – С.70–72.

8 **Марков, В. А., Деяннин, С. Н., Зыков, С. А., Гайдар, С. М.** Биотопливо для двигателей внутреннего сгорания/монография. – М. : НИЦ «Инженер» (Союз НИО), 2016. – 292 с.

9 **Есенов, Е., Колупаев, Н.** Малая распределённая энергетика и ВИЭ ЭНЕРГЕТИКА. – 2020. – № 1 (72)6. – С. 17–19. – www.kazenergy.kz

10 **Рустамов, Н. Т., Меирбекова, О. Д.** Система распределенной генерации на базе газотурбинного генератора. Международная научно-техническая конференция «Проблемы и решения эффективного использования альтернативных источников энергии» 1 часть. – Фергана, 2023.

11 Буланин, В. А., Буланин, А. В., Лапин, Е. А. Газотурбинные технологии – в энергетику Белгородской области // Газотурбинные технологии. – 2001. – №1. – С. 14–16.

12 Рустамов, Н. Т., Мейрбеков, А. Т., Мейрбекова, О. Д. Способ всесезонного электроснабжения теплицы из альтернативного источника энергии. Патент РК на полезный модель № 6797 от 04.01.2022.

13 Amer, M., et al. «A review of hybrid renewable energy systems for electricity generation: configurations, control, and applications». Renewable and Sustainable Energy Reviews, 70. – 2017. – P. 1331–1345.

14 Kalantar, M., & Mousavi, G. «Dynamic modeling and simulation of a solar–wind–diesel–fuel cell hybrid power system». – Renewable Energy. – 34(1). – 2010. – P. 174–179.

15 Рустамов, Н. Т., Мейрбеков, А. Т., Авезова, Н. Р., Мейрбекова, О. Д., Бабахан, Ш. А. Гибридная система для выработки тепловой и электрической энергии. Патент на полезную модель № 7970 от 24.11.2023.

References

1 Al'ternativnye istochniki syr'ya i topliva: tezisy dokladov konferencii AIST–2017 [Alternative sources of raw materials and fuels: abstracts of the AIST–2017 conference], 30 maya–1 iyunya 2017 g., Minsk. – Minsk: Institut himii novykh materialov NAN Belarusi, 2017. — 79 p.

2 Aref'ev, S. N. Opyt koncessii biotoplivnoj kotel'noj [Biofuel boiler concession experience]// Novosti teplosnabzheniya. – 2015. – № 10(182). – P. 28–29.

3 Afonina, E. O. Metody podgotovki biogaza pered ego podmeshivaniem v set' prirodnogo gaza [Methods of biogas preparation before mixing it into the natural gas network] // Aktual'nye problemy energetiki APK: materialy IX mezhdunar. nauch.-praktich. konf. – Saratov : CeSAin, 2018. – P. 8.

4 Andysheva, M. S. Biogaz – al'ternativnyj istochnik energii [Biogas is an alternative energy source]// Vestn. NGIEI. Ser. Tekhn. nauki. – 2014. – Vyp. 6(37). – P. 22–26.

5 Batorshin, V. A., Kotler, V. R. Zarubezhnyj opyt ispol'zovaniya biomassy v kachestve topliva dlya energeticheskikh kotlov [Foreign experience in using biomass as fuel for power boilers]// Energetika za rubezhom. – 2016. – № 6. – P. 25–35.

6 Bessmertnyh, A. V., Zajchenko, V. M., Majkov, I. L. O klassifikacii ispol'zuemykh v elektroenergetike vidov biomassy [On the classification of types of biomass used in the electric power industry] // Prom. energetika. – 2013. – № 4. – С. 54–57.

7 Huzhakulov, A. F., Tilloev, L. I., Mahmudov, M. Zh. i dr. Biogazovye energeticheskie ustanovki dlya fermerskikh hozyajstv. Analiz processov, vliyayushchih na effektivnost' ih ispol'zovaniya [Biogas power plants for farms. Analysis of processes affecting the effectiveness of their use]// Molodoj uchenyj. – 2013. – № 2(49). – P. 70–72.

8 Markov, V. A., Devyanin, S. N., Zykov, S. A., Gajdar S. M. Biotoplivo dlya dvigatelej vnutrennego sgoraniya [Biofuels for internal combustion engines] /monografiya. – M. : NIC «Inzhener» (Soyuz NIO), 2016. – 292 p.

9 Esenov, E., Kolupaev, N. Malaya raspredelyonnaya energetika i VIE [Small distributed energy and renewable energy sources] ENERGETIKA № 1 (72) | mart [2020]. – P. 17-19. – www.kazenergy.kz

10 Rustamov, N. T., Meirbekova, O. D. Sistema raspredelennoj generacii na baze gazoturbinnogo generatora [A distributed generation system based on a gas turbine generator]. Mezhdunarodnaya nauchno-tehnicheskaya konferenciya «Problemy i resheniya effektivnogo ispol'zovaniya al'ternativnyh istochnikov energii» 1 chast'. – Fergana, 2023.

11 Bulanin, V. A., Bulanin, A. V., Lapin, E. A. Gazoturbinnye tekhnologii — v energetiku Belgorodskoj oblasti [Gas turbine technologies – for the energy sector of the Belgorod region] // Gazoturbinnye tekhnologii. – 2001. – № 1. – P. 14–16.

12 Rustamov, N. T., Meirbekov, A. T., Meirbekova, O. D. Sposob vsesezonnogo elektrosnabzheniya teplicy iz al'ternativnogo istochnika energii. [A method of year-round power supply to a greenhouse from an alternative energy source] Patent RK na poleznyj model' № 6797 ot 04.01.2022.

13 Amer, M., et al. «A review of hybrid renewable energy systems for electricity generation: configurations, control, and applications». Renewable and Sustainable Energy Reviews, 70. – 2017. – P.1331–1345.

14 Kalantar, M., & Mousavi, G. «Dynamic modeling and simulation of a solar–wind–diesel–fuel cell hybrid power system». Renewable Energy. – 34(1). – 2010. – P. 174–179.

15 Rustamov, N. T., Meirbekov, A. T., Avezova, N. R., Meirbekova, O. D., Babahan, Sh. A. Gibridnaya sistema dlya vyrabotki teplovoj i elektricheskoy energii [A hybrid system for generating heat and electricity]. Patent na poleznuyu model' № 7970 ot 24.11.2023.

Поступило в редакцию 01.11.25.

Поступило с исправлениями 05.11.25.

Принято в печать 27.02.26.

Н. Т. Рустамов¹, *О. Д. Мейрбекова², А. Н. Бергузинов³, А. Г. Калтаев⁴

^{1,2}Қожа Ахмет Ясауи атындағы Халықаралық қазақ-түрік университеті, Қазақстан Республикасы, Түркістан қ.;

^{3,4}Торайғыров университеті,
Қазақстан Республикасы, Павлодар қ.
01.11.25 ж. баспаға түсті.
05.11.25 ж. түзетулерімен түсті.
27.02.26 ж. басып шығаруға қабылданды.

БИООТЫНМЕН ЖҰМЫС ІСТЕЙТІН ГИБРИДТІ ТАРАТЫЛҒАН ГЕНЕРАЦИЯ

Таратылған генерация (ТГ) энергостанцияларын пайдалану барысында негізгі мәселелердің бірі – тұтынушыларды тұрақты әрі үздіксіз электр энергиясымен қамтамасыз ету. Бұл мәселе әсіресе гибриді ТГ жүйелерінде өзекті, өйткені олар күн және жел сияқты жаңартылатын энергия көздеріне негізделген, ал мұндай көздердің өндірісі ауа райы жағдайына және тәулік уақытына тікелей тәуелді. Дәстүрлі түрде бұл мәселе дизель немесе бензинмен жұмыс істейтін қосалқы генераторларды қолдану арқылы шешілетін. Алайда мұндай шешімдер өндірілетін электр энергиясының өзіндік құнын айтарлықтай арттырып, қоршаған ортаға зиянды заттардың шығарындыларын көбейтеді.

Ұсынылып отырған шешім автономды және экологиялық тұрғыдан тұрақты энергия жүйесін құруға бағытталған. Бұл жүйеде отын ретінде ауыл шаруашылығы мен мал шаруашылығы қалдықтарынан алынған биогаз пайдаланылады. Мұндай тәсіл пайдалану шығындарын азайтып қана қоймай, қалдықтарды қайта өңдеуге мүмкіндік беріп, экологиялық жағдайды жақсартыады. Газтурбиналық генератор (ГТГ) негізгі энергия көзі ретінде қолданылады, ол когенерациялық режимде жұмыс істей алады, яғни бір мезгілде электр және жылу энергиясын өндіреді. Бұл әсіресе шалғай және қолжетімсіз аймақтарда маңызды, өйткені мұндай жерлерде электрмен қатар жылумен жабдықтау да қажет. Осылайша, биототықты отынмен жұмыс істейтін ГТГ қолдану энергия тиімділігін арттырып, өндірілетін электр энергиясының өзіндік құнын төмендетеді және сыртқы энергия көздеріне тәуелділікті азайтады.

Кілтті сөздер: таратылған генерация, когенерациялық режим, ГТГ жұмыс тиімділігі, биоотын, биогаз.

N. T. Rustamov¹, *O. D. Meirbekova², A. N. Berguzinov³, A. G. Kaltayev⁴

^{1,2}Akhmet Yassawi International Kazakh–Turkish University,
Republic of Kazakhstan, Turkistan;

^{3,4}Toraighyrov University,
Republic of Kazakhstan, Pavlodar.
Received 01.11.25.
Received in revised form 05.11.25.
Accepted for publication 27.02.26.

BIOFUEL-POWERED HYBRID DISTRIBUTED GENERATION

During the operation of distributed generation (DG) power plants, one of the key challenges is ensuring stable and uninterrupted power supply to consumers. This issue is particularly relevant for hybrid DG systems based on renewable energy sources such as solar and wind energy, whose output directly depends on weather conditions and the time of day. Traditionally, this problem was solved by using backup diesel or gasoline generators that automatically started when the main sources lost power. However, such solutions significantly increase the cost of electricity production and contribute to higher emissions of harmful substances into the atmosphere.

The proposed solution aims to create an autonomous and environmentally sustainable energy system. As fuel, biogas obtained from agricultural and livestock waste is used. This approach not only reduces operating costs but also promotes waste recycling and improves environmental conditions. The generating equipment is a gas turbine generator (GTG), which operates in a cogeneration mode, simultaneously producing both electrical and thermal energy. This is especially important for remote and hard-to-reach regions where there is a need for both electricity and heat. Thus, the use of GTG running on biofuel increases energy efficiency, lowers the cost of generated electricity, and reduces dependence on external energy sources.

Keywords: distributed generation, cogeneration mode, efficiency of HDG operation, biofuels, biogas.

<https://doi.org/10.48081/BGQF1960>

***Л. А. Садыкова¹, С. В. Олейников²,
Б. А. Сарғужиева³, Н. Г. Буранова⁴**

^{1,2,3,4}Западно-Казахстанский инновационно-технологический университет,
Республика Казахстан, г. Уральск.

¹ORCID: <https://orcid.org/0009-0005-3786-8529>

²ORCID: <https://orcid.org/0009-0008-3751-9048>

³ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-2618-9529>

⁴ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-0440-5948>

*e-mail: lazatsadykova022@gmail.com

ПЕРСПЕКТИВЫ ПРИМЕНЕНИЯ СУХИХ ГАЗОДИНАМИЧЕСКИХ УПЛОТНЕНИЙ НА КОМПРЕССОРНЫХ АГРЕГАТАХ НЕФТЕПЕРЕРАБАТЫВАЮЩЕГО ЗАВОДА

В данной статье проанализированы перспективы применения сухих газодинамических уплотнений на центробежных компрессорных агрегатах, применяемых в нефтегазовой отрасли Казахстана. Рассмотрены принципиальные основы управления такими уплотнениями, обеспечивающие их надежную и безопасную эксплуатацию на центробежном компрессоре ЦК-1 Атырауского нефтеперерабатывающего завода. Большинство центробежных компрессоров выпускались с торцевыми уплотнениями масляного типа. Проблема при использовании традиционных «масляных» уплотнений, состоит в риске перегрева картриджей из-за высоких окружных скоростей, особенно, если при этом и давление среды высокое. Утечки масла создавали свои проблемы, решение которых требовало значительных финансовых затрат. В отличие от «масляных» уплотнений, в «сухих» уплотнениях непосредственного контакта между уплотняющими втулками во время работы нет и, соответственно, отсутствует нагрев. В статье описан принцип работы газодинамической ступени. Подробно описано как на Атырауском нефтеперерабатывающем заводе провели модернизацию центробежного компрессора, приведена принципиальная схема системы сухих газодинамических уплотнений, принципиальная схема блока буферного газа, принципиальная

схема блока разделительного газа, перечислены преимущества использования сухих газодинамических уплотнений по сравнению с масляной системой уплотнений. Также предложена система контроля режимов работы узлов системы сухих газодинамических уплотнений.

Ключевые слова: компрессор, агрегат, уплотнение, схема, надежность, процесс, масло, контакт.

Введение

Общеизвестно, что центробежные компрессоры различного типа и назначения широко применяются в нефтегазовой отрасли для перекачки газообразных углеводородных газов. При этом, одной из наиболее остро стоящих технических проблем у таких компрессоров, является проблема надежности уплотнений вала ротора [1, с. 32].

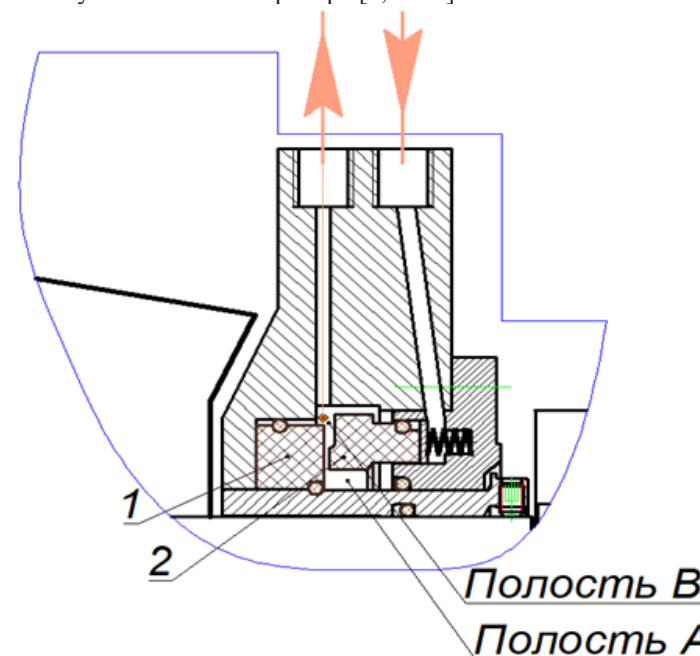


Рисунок 1 – Схема масляного уплотнения

До 2004 года большинство центробежных компрессоров выпускались с торцевыми уплотнениями масляного типа (рис.1), когда запирающие пары трения

(неподвижный 1 и вращающийся 2 картриджи) осуществлялось давлением масла, подаваемого под давлением на $1,5 \div 2,0$ % выше, нежели давление перекачиваемого газа.

Однако, проблема при использовании традиционных «масляных» уплотнений, состоит в риске перегрева картриджей из-за высоких окружных скоростей, особенно, если при этом и давление среды высокое. Например, природный газ под давлением 70 кгс/см^2 и при частоте вращения 6500 об/мин очень сложно уплотнить обычным «масляным» уплотнением. При таких высоких значениях давления и скоростей, торцевое уплотнение должно иметь высокий нормированный уровень протечек между полостями А и В (рис. 1) для предотвращения перегрева и выхода из строя картриджей, а, следовательно, всего уплотнения.

Основная часть протечек «масло – газ» собирается и возвращается в маслобак с последующим выводом газа в факельный резервуар или на свечу. А вот с маслом возникает другая проблема. Какое-то количество барьерной жидкости (масла) попадает в компримируемый газ. Для одних потребителей это «всего лишь» стоимость масла, часто 1-3 бочки в сутки, как например, в системе масляных уплотнений компрессоров RF 2BB-30 фирмы Купер-Бессемер, работающих в составе газоперекачивающих агрегатов УМГ «Уральск».

Утечки масла для некоторых технологических процессов, создавали свои проблемы, решение которых требовало значительных финансовых затрат [2, с. 121]. Например, потери от загрязнения дорогостоящего катализатора, используемого в реакторах каталитического риформинга на НПЗ. Так, на установке каталитического риформинга, утечки масла при перекачке водородосодержащего газа сокращают срок службы рениево-платинового катализатора примерно в 3 раза. А учитывая стоимость такого катализатора, становится ясно, что стоимость катализата для производства высокооктанового бензина значительно увеличивается. Что, собственно, сказывается и на конечной продукции Атырауского нефтеперерабатывающего завода (АНПЗ),

В отличие от «масляных» уплотнений, в «сухих» уплотнениях непосредственного контакта между уплотняющими втулками во время работы нет и, соответственно, отсутствует нагрев.

Материалы и методы

Описание работы сухого газодинамического уплотнения (СГДУ). Принцип работы газодинамической ступени, представленной на рисунке 2 заключается в следующем: аксиально-подвижное кольцо 2 совместно с вращающимся кольцом 1 образуют торцевой уплотнительный зазор.

Область высокого давления газа P_0 отделяется от области низкого давления P_2 резиновыми уплотнительными кольцами 3 и 4. Кольцо 4 не препятствует осевой подвижности кольца 2. На вращающемся кольце 1 лазером выполнены спиральные канавки глубиной $5 \div 10 \text{ мкм}$ и углом наклона ϕ_1 и ϕ_2 к наружному радиусу.

Следует отметить, что формы канавок, предлагаемые фирмами-производителями СГДУ, могут быть различными [3, с. 18], в зависимости от таких параметров компрессоров, как скоростных, реверсивное или не реверсивное исполнение компрессора, давлением перекачиваемого газа и т.д. В частности, приведенная на рисунке 2 форма канавок однонаправленного вращения вала компрессора, получила наибольшее распространение у фирм-производителей СГДУ: ЗАО «НИИтурбокомпрессор им. В.Б. Шнеппа», «JohnCrane», ЗАО «ТРЭМ Инжиниринг», ООО НПФ «Грейс-инжиниринг», «EagleBurgmann» и др.

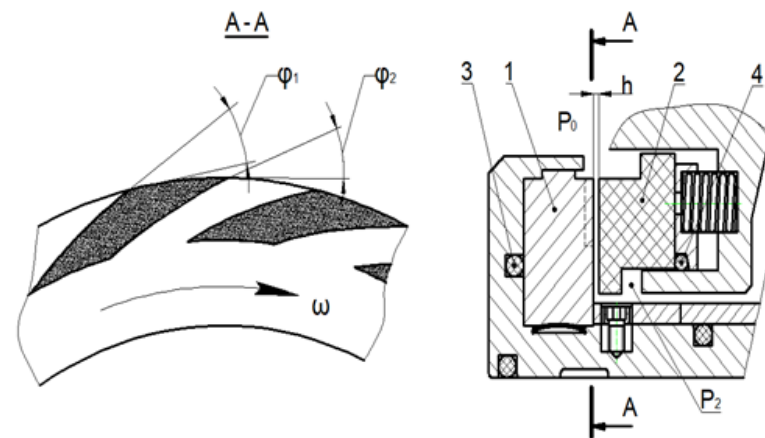


Рисунок 2 – Схема одноступенчатого СГДУ

При вращении кольца 1 (направление вращения показано на схеме стрелкой с угловой скоростью ω) на тыльных стенках канавок возникают аэродинамические силы, которые захватывают газ из полости с давлением P_0 и перемещают его вдоль осей канавок к центру. Газодинамическое давление в канавках возрастает до некоторого наибольшего значения $P_k > P_0$, распространяясь и за пределы канавок. Далее давление уменьшается в направлении к центру, постепенно достигая значения давления за

уплотнением Р2 [4, с. 118]. В следствии влияния аэродинамических сил, действующих между кольцами газодинамической ступени, аксиально-подвижное кольцо отодвигается от вращающегося кольца («подвсплывает»), образуя уплотнительный зазор h , проходя через который уплотняемый газ составляет утечку Q .

Долговечность пар трения достигается за счет обеспечения рабочего зазора между вращающимся 1 и аксиально-подвижным кольцом величиной $h = 2 \div 4$ мкм, обеспечивающего «сухое» газодинамическое трение в рабочем режиме. При остановках компрессора, герметизация достигается за счет плотного прилегания торцевых поверхностей диска и кольца.

На Атырауском нефтеперерабатывающем заводе (АНПЗ) при непосредственном участии специалистов ТОО «БатысТехСервис» провели модернизацию центробежного компрессора ЦК-1 установки каталитического риформинга (установка ЛГ-35-11/300-95) цеха № 3 с заменой масляных торцевых уплотнений «сухими» двойными газодинамическими уплотнениями фирмы «ТРЭМ Инжиниринг», которые обеспечивают повышенную надежность.

Принципиальная схема системы СГДУ на ЦК-1, приведена на рисунке 3а. СГДУ состоит из двух ступеней уплотнений: первая (так называемая рабочая) разделяет полости А и В, вторая ступень (страховочная) полости В и С [5, с. 35]. Каждая ступень включает вращающую часть, установленную на валу 2, и неподвижную, установленную в корпусе компрессора 1.

Герметизацию обеспечивает пара трения: вращающийся диск 3А, 3В и аксиально-подвижное кольцо 4А, 4В.

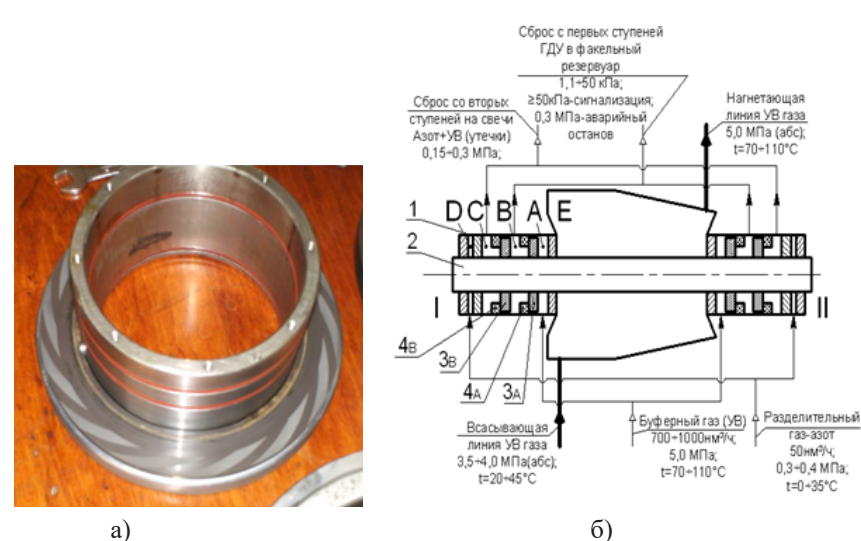


Рисунок 3 – Принципиальная схема системы сухих газодинамических уплотнений

Преимущества использования СГДУ по сравнению с масляной системой уплотнений:

- обеспечивается полная герметичность на стоянке и незначительные утечки газа при вращении вала, примерно в 10 раз меньше, нежели с масляными уплотнениями;
- отсутствует необходимость смазки пары трения маслом или другой жидкостью за счет использования газовой смазки (гарантированный зазор $2 \div 4$ мкм обеспечивается нагнетанием газа в уплотнительную щель);
- не требуется существенной доработки корпуса и вала при замене штатного уплотнения на СГДУ;
- упрощается маслосистема (полностью демонтируется масляная система высокого давления, обеспечивающая запирание трущихся пар), снижаются невосполнимые потери масла и расход электрической энергии на привод насосов масляной системы (выводится из эксплуатации электродвигатель мощностью 37 кВт с непрерывным режимом работы в 8000 часов);
- высокая безопасность и длительный ресурс (срок службы до 100000 ч против 8000 ч для масляных уплотнений);
- незначительные потери мощности на трение;
- снижаются эксплуатационные затраты (регламент – через 12000 ч);

– исключается попадание масла в перекачиваемый компрессором газ. В этом случае выдерживается нормативный срок использования катализатора – 15 лет, против 5 при использовании масляного уплотнения [6, с. 148]. С целью унификации, уплотняющие устройства и подшипниковые узлы со стороны всасывания I и со стороны нагнетания II изготавливаются одной конструкции и типоразмера.

Смазочное масло будет иметь естественную тенденцию мигрировать вдоль вала от подшипника к барьерному уплотнению, что требует проектирования полости подшипника таким образом, чтобы минимизировать воздействие смазочного масла на барьерное уплотнение [7, с. 205].

При работе компрессора, в его рабочей полости Е давление перекачиваемого газа возрастает от 3,5÷4,0 МПа на всасе до 5,0 МПа на выходе. По задуманной линии часть углеводородного (УВ) из нагнетающей линии подается в полости А со стороны всасывания I и нагнетания II в виде буферного газа.

Основной рабочей ступенью СГДУ является первая ступень, именно она обеспечивает герметизацию торцевого уплотнения. Вторая ступень является резервной, обеспечивающей герметизацию в так называемом «аварийном режиме». Буферный газ, в качестве которого выступает перекачиваемый водородосодержащий газ, служит для «запирания» первой (рабочей) ступени. Он подается в рабочую полость А с давлением чуть выше давления перекачиваемого газа у ступицы ротора. Утечки буферного газа из полости В через пару трения 3А ÷ 4А сбрасываются в факельную систему для утилизации (используется в качестве топливного газа или сжигается на факеле).

«Запираение» второй (страховочной) ступени осуществляется давлением утечек буферного газа в полости В, а для надежного отсечения от атмосферы – используется разделительный инертный газ, подаваемый в полость D. В качестве разделительного газа используется азот, установки для производства которого, имеются практически на всех НПЗ. Разделительный газ совместно с некоторыми утечками буферного газа, сбрасываются на свечи.

Поскольку сухие газодинамические уплотнения используются, в основном, для уплотнения валов компрессоров (нагнетателей), то они изготавливаются по требованиям стандарта для компрессоров API 617 «Осевые и центробежные компрессоры и детандер-компрессоры». Некоторые технические требования также указаны в стандарте API 682 (стандарт по торцевым уплотнениям), так как сухие уплотнения используются также и для уплотнения валов насосов.

Стандарт API STD 617 определяет минимальные требования и дает рекомендации для осевых компрессоров, однофазных и интегрально-редукторных центробежных компрессоров и детандер-компрессоров

специального назначения, которые обрабатывают газ или технологический воздух в нефтяной, химической и газовой промышленности. Эта часть API 617 определяет общие требования, применимые ко всем таким машинам.

Применение газодинамических уплотнений для уплотнения валов компрессоров значительно возросло за последние 20 лет ввиду целого ряда преимуществ для потребителя.

Вышеуказанные сухие уплотнения могут иметь следующие конфигурации:

- Тандемные уплотнения - как с дополнительным лабиринтным уплотнением, так и без него;
- Двойные уплотнения - как с дополнительным лабиринтным уплотнением, так и без него;
- Тройные уплотнения для особо чистых процессов (сочетание уплотнений тандемного и двойного типа для предотвращения попадания азота в перемещаемый газ и исключения протечки перемещаемого газа в подшипниковый узел или в атмосферу).

Пример двойного СГДУ производства ЗАО «ТРЭМ Инжиниринг» показан на рисунке 4.

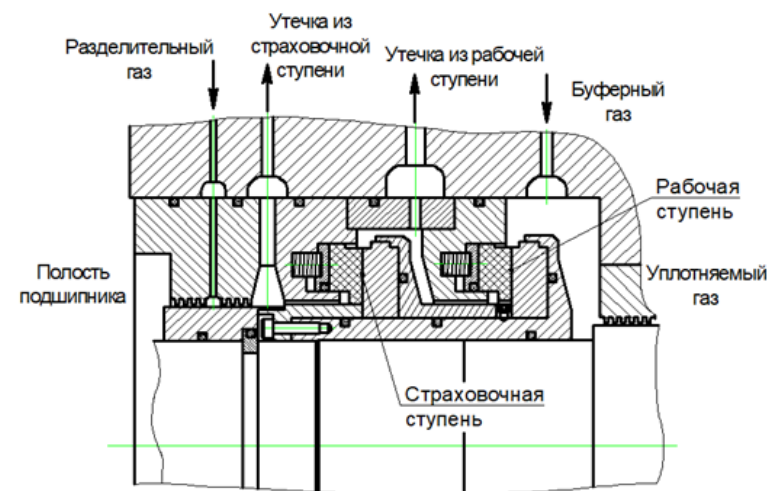


Рисунок 4 – Двойное (тандемное) СГДУ ЗАО «ТРЭМ Инжиниринг»

Все газодинамические уплотнения проходят стендовые испытания на рабочих параметрах, а также разгонные испытания на параметрах, превосходящие рабочие. Процедура испытания соответствует стандарту

API617 [8, с. 12]. На испытания приглашаются, как правило, представители Заказчика, на оборудовании которого планируется установка данного уплотнения.

Следует отметить, что визуально отслеживать техническое состояние уплотнений, от которых в значительной степени зависит безопасность эксплуатации компрессоров, невозможно вследствие закрытой конструкции СГДУ. Кроме того, работа компрессора в соответствии с производственной необходимостью, требует смены технологических режимов, что, в свою очередь, требует соответствующих изменений в подаче буферного и разделительного газа. Таким образом, установка СГДУ на действующие компрессоры, требует не только механической их доработки, но и модернизации системы автоматической защиты и управления.

Результаты и обсуждения

Оборудование системы управления, входящей в состав СГДУ должно обеспечивать три основные функции:

1. Дистанционный контроль и поддержание параметров работы СГДУ в заданных пределах;
2. Выдачу в систему управления компрессором унифицированных выходных сигналов предупредительной сигнализации.

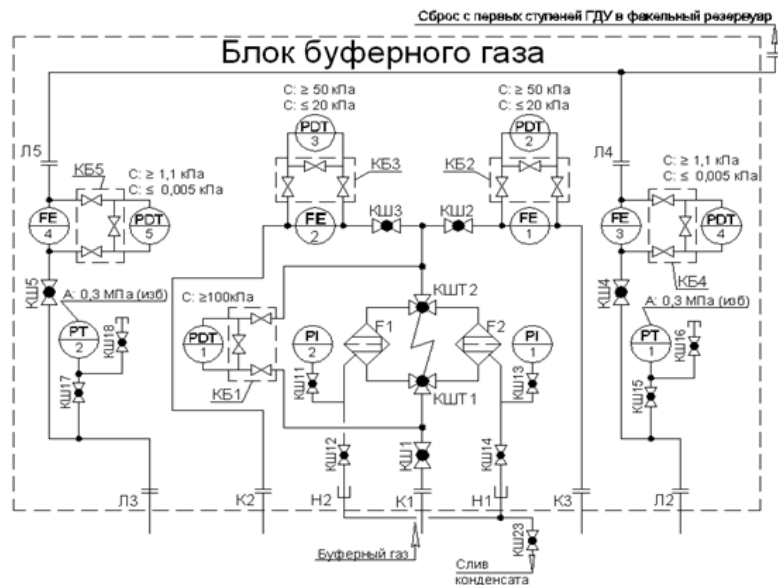


Рисунок 5 – Принципиальная схема блока буферного газа

3. Автоматических аварийных остановов и блокировок по опасным образующим факторам.

В общем случае система управления уплотнениями состоит из трех функциональных подсистем [8, с. 4-5]:

- подачи буферного газа на уплотнения;
- подачи разделительного газа в лабиринтные или щелевые уплотнения;
- отвода утечек из внутренних (рабочих) ступеней уплотнений.

Подсистема подачи буферного газа на уплотнения должна включать фильтр с байпасным краном или фильтры с крановой обвязкой, позволяющей производить переключение с одного фильтра на другой в процессе работы. Датчик перепада давлений на работающем фильтре с выдачей сигнала о достижении предельного значения. Краны с трубопроводной обвязкой для заполнения газом неработающего фильтра перед включением его в работу и для стравливания газа из отключенного фильтра перед заменой его фильтрующего элемента. Манометров, контролирующих давление в фильтрах, регулирующий клапан с ручным, пневматическим или электрическим приводом для поддержания заданного перепада давлений или расхода буферного газа на уплотнения и датчиков перепада давлений на диафрагмах или расхода буферного газа на каждое уплотнение.

Повышенные требования к чистоте буферного газа обусловили необходимость установки газового коалесцентного фильтра, а для обеспечения непрерывности технологического процесса, таких фильтров установлено два F1 и F2. Их попеременную работу обеспечивают два синхронных трехходовых крана КШТ1 и КШТ2. Техническое состояние рабочего фильтра отслеживается в непрерывном режиме реального времени с помощью датчика разности давления PDT1, подключенного через клапанный блок КБ1. При перепаде давления ≥ 100 кПа, датчик выдает сигнал на АРМ оператора, указывающий о предельной степени загрязнения фильтра. Линия подачи буферного газа переключается на резервный фильтр, а из загрязненного фильтра с помощью кранов КШ12 и КШ14 сливается конденсат и, при необходимости осуществляется замена фильтрующего элемента и коалесцирующей насадки. Для визуального контроля остаточного давления газа в фильтре установлены манометры PI1 и PI2.

После фильтрации буферный газ делится на два потока: поток со стороны нагнетания и со стороны всасывания. Как уже отмечалось в [2, с.126], конструкция и режимы работы СГДУ с обеих сторон одинаковы. Для дозирования и количественного контроля объема подаваемого газа, установлены диафрагмы FE1 и FE2, параллельно которым через клапанные блоки КБ2 и КБ3, подключены датчики разности давлений PDT2 и PDT3.

Датчики выдают сигнал при понижении давления ≤ 20 кПа и при повышении давления ≥ 50 кПа. В первом случае давление буферного газа в рабочей полости ГДУ недостаточно, что может привести к «сухому трению» и перегреву уплотнения – исключается газодинамический зазор. Во втором случае, повышенный перепад давления (увеличение расхода буферного газа) свидетельствует о выработке ресурса ГДУ и о необходимости замены уплотняющей пары.

«Низкая» сторона блока буферного газа (отвод из полости В, рис.3а), представлена линиями отвода утечек с первых ступеней ГДУ, на которых установлены датчики избыточного давления РТ1 и РТ2. Датчики выдают сигнал на АРМ оператора и одновременно дают команду на автоматический останов компрессора, когда избыточное давление в полости В достигнет 0,3 МПа. Это будет свидетельствовать о практическом выходе из строя уплотнения первой ступени. Для определения расхода утечек, что позволяет контролировать баланс буферного газа, и косвенного контроля состояния уплотнения первой ступени, на данной линии установлены диафрагмы, а параллельно им через клапанные блоки КБ-4 и КБ-5, датчики разности давлений РДТ4 и РДТ5. Датчики выдают сигнал при понижении давления $\leq 0,005$ кПа и при повышении давления $\geq 1,1$ кПа.

Блок буферного газа (рис.5) можно условно разделить на «высокую» (подача в полость А, рис.3а) и «низкую» (отвод из полости В, рис.3а) стороны. Высокая сторона включает линию подачи буферного газа К1. В качестве буферного газа используется перекачиваемый водородосодержащий газ (ВСТ) из линии нагнетания компрессора. На линии подачи буферного газа ставится отсекающий кран КШ1.

Подсистема подачи разделительного газа в лабиринтные или щелевые уплотнения должна включать фильтр, регулятор давления типа «после себя» с байпасным краном, датчик давления разделительного газа на входе в уплотнения с выдачей сигнала при снижении давления ниже нормы и регулирующие вентили для настройки давления подачи газа на каждое уплотнение.

Блок разделительного газа (рис.6) включает: основную и резервную линии подачи азота с входной запорной арматурой КО1, КО2, КШ24 и КШ25. Фильтр-регулятор FRD с входным РІЗ и выходным РІ4 манометрами.

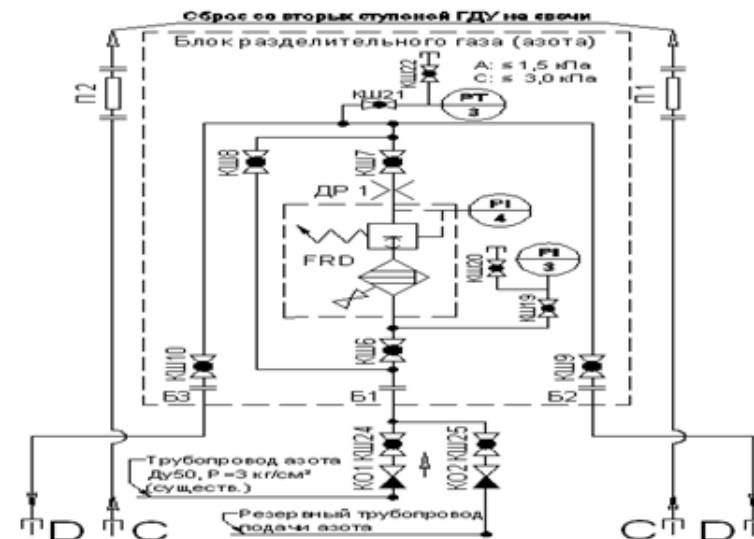


Рисунок 6 – Принципиальная схема блока разделительного газа

За фильтром-регулятором установлен дроссель ДР 1. На период пусконаладочных работ на место проставок П1 и П2 устанавливаются ротаметры, по которым, с помощью фильтра-регулятора и дросселя осуществляется достаточно точная регулировка пределов срабатывания датчика разности давлений РТ3. Сигнализация регулируется на срабатывание при превышении давления азота в полости D $\leq 3,0$ кПа, а аварийное отключение – при падении давления в этой полости св. $\leq 1,5$ кПа. После завершения регулировки, ротаметры заменяются на проставки.

Подсистема отвода утечек из внутренних ступеней уплотнений должна включать датчики давления утечек с выдачей аварийных сигналов по превышению заданного значения, датчики перепада давлений на диафрагмах или расходомеры с выдачей предупредительных сигналов по минимальным и максимальным значениям [9, с. 5-8].

Таким образом, общую картину управления СГДУ можно представить следующей схемой (рис.7), которая показывает размещение приборов, параметры сигнализаций и аварийных остановов (блокировок).

Надежность работы СГДУ зависит от многих факторов, различных по функциональному назначению и значимости для безопасности процесса.

Блок буферного газа

Поскольку динамический зазор в картридже СГДУ первой ступени в штатном режиме составляет $3 \div 4$ мкм, то необходима ступень очистки и осушки буферного газа, подаваемого в полость перед картриджем. Эту функцию выполняют попеременно коалесцирующие фильтры F1 и F2 (один в работе, второй в резерве).

Контроль загрязненности фильтров осуществляется с помощью измерительного преобразователя перепада давлений PDT1, сигнал от которого идет на вторичный прибор оператора с дублирующим предупредительным световым индикатором [12, с. 22]. По этому сигналу оператор дает команду переключиться на второй фильтр, а служба эксплуатации обязана сдrenировать конденсат из полости фильтра и, при необходимости, провести сервисное обслуживание фильтрующего элемента. Для безопасного ведения работ по разгерметизации фильтров, на каждом фильтре установлены визуальные манометры PI1 и PI2, показания которых свидетельствуют о наличии или отсутствии избыточного давления в полости. Очищенный буферный газ подается на первую ступень СГДУ.

Первичный сигнал подачи буферного газа в полости перед картриджем первой ступени дают датчики разности давлений PDT2 и PDT3, установленных параллельно калиброванным вставкам FE1 и FE2, на линии всасывания и нагнетания соответственно и отслеживают по показаниям вторичных приборов и световым сигнализаторам предельных параметров. Большая часть буферного газа проходит через лабиринтное уплотнение в сторону проточной части компрессора, а меньшая часть проходит через рабочую пару внутрь картриджа и затем сбрасывается через линию первичной протечки в факельный резервуар. Надежность работы СГДУ отслеживается по давлению в полостях между первой и второй ступенями. Первичные датчики PT1 и PT2 выдают сигналы на вторичные приборы и световую сигнализацию: предупреждающую и аварийного останова. Датчики перепада давлений PDT4 и PDT5, установленные параллельно калиброванным вставкам FE3 и FE4, выдают сигналы на предупреждающую сигнализацию, которая свидетельствует о предельных утечках через первую ступень.

Вторая ступень СГДУ является предохранительной от аварийного выброса ВСГ в помещение машинного зала, где установлен компрессор, в случае аварийного выхода из строя первой ступени и останова компрессора.

Блок разделительного газа

Разделительный газ отсекает полость картриджа СГДУ после второй ступени с возможными малыми утечками от полости подшипника и далее от помещения машинного зала. По этой причине, в качестве разделительного газа используется нейтральный газ - азот. Требования к чистоте разделительного газа не такие жесткие, как к буферному. Поэтому на линии подачи азота устанавливается один аналогичный фильтр FRD. Контроль подачи разделительного газа осуществляется по давлению в линии подачи. Первичный прибор – датчик давления PT3. На интерфейс оператора выводится показание вторичного прибора, предупредительная и аварийная сигнализация.

Выводы

Проблема при использовании традиционных «масляных» уплотнений, состояла в риске перегрева картриджей из-за высоких окружных скоростей, особенно, если при этом и давление среды высокое. Утечки масла создавали свои проблемы, решение которых требовало значительных финансовых затрат. В отличие от «масляных» уплотнений, в «сухих» уплотнениях непосредственного контакта между уплотняющими втулками во время работы нет и, соответственно, отсутствует нагрев.

Таким образом, предложенная система контроля режимов работы узлов СГДУ обеспечивает минимум необходимой и достаточной информации, позволяющей в полуавтоматическом режиме эксплуатировать центробежный компрессор после модернизации, обеспечивая его безопасную эксплуатацию.

Список использованных источников

- 1 Фалалеев, С. В., Новиков, Д. К. Сухое газовое уплотнение для нагнетателя [Текст] // Газовая промышленность. – 1998. – № 4. – С. 55–57.
- 2 Седов, В. В., Фалалеев, С. В. Снижение стоимости жизненного цикла торцовых газодинамических уплотнений ГПА [Текст] // Газотурбинные технологии. – 2008. – № 7. – С. 8–12.
- 3 Белоусов, Ю., Кочетов, Д., Кравцов, Д., Шайхутдинов, А., Еремин, С. Особенности работы сухих нагнетателей в предподмажных режимах [Текст] // Газотурбинные технологии. – Рыбинск, 2004. – № 3. – С. 18–21.
- 4 Фалалеев, С. В., Новиков, Д. К., Косицын, И. П., Вигурский, А. В. Опыт создания «сухих» уплотнений для высокооборотного компрессора [Текст] // Труды 11-й международной научно-технической конференции «Герметичность, вибронадежность и экономическая безопасность насосного и компрессорного оборудования». – Сумы, 2005. – 270 с.

5 **Фалалеев, С. В., Балякин, В. Б., Новиков, Д. К., Россеев, Н. И., Медведев, С. Д.** Динамика «сухих» уплотнений [Текст] // Газовая промышленность. – 2001. – № 10.

6 **Stahley, J. S.** Design, Operation, And Maintenance Considerations For Improved Dry Gas Seal Reliability In Centrifugal Compressors [Text]. – 2001. – P. 203–208.

7 **Голубев, А. И., Кондаков, Л. А.** Уплотнения и уплотнительная техника : справочник [Текст]. – М.: Машиностроение, 1986. – 464 с.

8 **Олейников, С. В., Нуралина, А. Б.** Сухие газодинамические уплотнения центробежных компрессоров и принципы управления: сборник статей магистрантов ЗКГУ [Текст]. – Уральск : Изд-во ЗКГУ, вып. 1, 2009. – С. 125–128.

9 **Олейников, С. В., Нуралина, А. Б.** Основные принципы управления СГДУ: материалы научно-практической конференции «Научно-технический прогресс: техника, технологии и образование» [Текст]. – Актобе : Изд-во АГПУ им. К. Жубанова, 2010. – С. 269–272.

10 **Гольвсвейн, Я.** Сухие уплотнения фирмы «John Crane» [Текст] // Труды VI научно-технической конференции «Уплотнения и вибрационная надёжность центробежных машин». – Сумы, 1991. – С. 295–313.

11 **Седов, В. В., Фалалеев, С. В.** Снижение стоимости жизненного цикла торцовых газодинамических уплотнений [Текст] // Газотурбинные технологии. – 2008. – № 7. – С. 8–12.

12 **Хедер, В.** Причины отказов насосов и компрессоров [Текст]. – М. : Гостехиздат, 1932. – 196 с.

References

1 **Falaleev, S. V., Novikov, D. K.** Sukhoe gazovoe uplotnenie dlya nagnetatelya [Dry gas seal for supercharger] [Text]. In Gazovaya promyshlennost. – 1998. – № 4. – P. 55–57.

2 **Sedov, V. V., Falaleev, S. V.** Snizhenie stoimosti zhiznennogo tsikla tortsovykh gazodinamicheskikh uplotneniy GPA [Reduction of the cost of the life cycle of mechanical gas dynamic seals GPA] [Text]. In Gazoturbinnye tekhnologii. – 2008. – № 7. – P. 8–12.

3 **Belousov, Yu., Kochetov, D., Kravtsov, D., Shaikhutdinov, A., Eremin, S.** Osobennosti raboty «sukhikh» nagnetateley v predpompazhnykh rezhimakh [Features of operation of «dry» superchargers in presurge modes] [Text]. In Gazoturbinnye tekhnologii. – Rybinsk, 2004. – № 3. – P. 18–21.

4 **Falaleev, S. V., Novikov, D. K., Kositsyn, I. P., Vigurskiy, A. V.** Opyt sozdaniya «sukhikh» uplotneniy dlya vysokooborotnogo kompressora [Experience in creating dry seals for a high-speed compressor] [Text]. In Trudy 11-oy mezhdunarodnoy nauchno-tekhnicheskoy konferentsii «Germetichnost, vibronadezhnost i ekonomicheskaya bezopasnost nasosnogo i kompressornogo oborudovaniya». – Sumy, 2005. – 270 p.

5 **Falaleev, S. V., Balyakin, V. B., Novikov, D. K., Rosseev, N. I., Medvedev, S. D.** Dinamika «sukhikh» uplotneniy [Dynamics of dry seals] [Text]. In Gazovaya promyshlennost. – 2001. – № 10.

6 **Stahley, J. S.** Design, Operation, And Maintenance Considerations For Improved Dry Gas Seal Reliability In Centrifugal Compressors [Text]. – 2001. – P. 203–208.

7 **Golubev, A. I., Kondakov, L. A.** Uplotneniya i uplotnitelnaya tekhnika : spravochnik [Seals and sealing technology : a reference book] [Text]. – Moscow : Mashinostroenie, 1986. – 464 p.

8 **Oleynikov, S. V., Nuralina, A. B.** Sukhie gazodinamicheskie uplotneniya tsentrobezhnykh kompressorov i printsipy upravleniya [Dry gas dynamic seals of centrifugal compressors and control principles] [Text]. In Sbornik statey magistrantov ZKGU. – Uralsk : Izd-vo ZKGU, vyp. 1, 2009. – P. 125–128.

9 **Oleynikov, S. V., Nuralina, A. B.** Osnovnye printsipy upravleniya SGDU [Basic principles of SRS management] [Text]. In Materialy nauchno-prakticheskoy konferentsii «Nauchno-tekhnicheskii progress: tekhnika, tekhnologii i obrazovanie». – Aktobe : Izd-vo AGPU im. K. Zhubanova, 2010. – P. 269–272.

10 **Golvsvayn, Ya.** Sukhie uplotneniya firmy «John Crane» [John Crane dry seals] [Text]. In «Uplotneniya i vibratsionnaya nadezhnost tsentrobezhnykh mashin» : Trudy VI nauchno-tekhnicheskoy konferentsii. – Sumy, 1991. – P. 295–313.

11 **Sedov, V. V., Falaleev, S. V.** Snizhenie stoimosti zhiznennogo tsikla tortsovykh gazodinamicheskikh uplotneniy [Reducing the life cycle cost of mechanical gas seals of gas pumping units] [Text]. In Gazoturbinnye tekhnologii. – 2008. – № 7. – P. 8–12.

12 **Kheder, V.** Prichiny otkazov nasosov i kompressorov [Causes of failures of pumps and compressors] [Text]. – Moscow : Gostekhzdat, 1932. – 196 p.

Поступило в редакцию 05.06.25.

Поступило с исправлениями 13.01.26.

Принято в печать 27.02.26.

*Л. А. Садыкова¹, С. В. Олейников², Б. А. Сарғужиева³, Н. Г. Буранова⁴

^{1,2,3,4}Батыс Қазақстан инновациялық-технологиялық университеті,

Қазақстан Республикасы, Орал қ.

05.06.25 ж. баспаға түсті.

13.01.26 ж. түзетулерімен түсті.

27.02.26 ж. басып шығаруға қабылданды.

ҚҰРҒАҚ ГАЗДИНАМИКАЛЫҚ ҚОЛДАНУ ПЕРСПЕКТИВАЛАРЫ КОМПРЕССОРЛЫҚ АГРЕГАТТАРДАҒЫ ТЫҒЫЗДАҒЫШТАР МҰНАЙ ӨНДЕУ ЗАУЫТЫ

Бұл мақалада Қазақстанның мұнай-газ саласында қолданылатын орталықтан тепкіш компрессорлық агрегаттарда құрғақ газ-динамикалық тығыздағыштарды қолдану перспективалары талданады. Атырау мұнай өңдеу зауытының ОК-1 орталықтан тепкіш компрессорында олардың сенімді және қауіпсіз пайдаланылуын қамтамасыз ететін осындай тығыздағыштарды басқарудың қағидатты негіздері қаралды. Орталықтан тепкіш компрессорлардың көпшілігі май түріндегі соңғы тығыздағыштармен шығарылды. Дәстүрлі «май» тығыздағыштарын пайдаланудағы мәселе, әсіресе қоршаған ортаның қысымы жоғары болса, жоғары айналым жылдамдығына байланысты картридждердің қызып кету қаупі болып табылады. Майдың ағуы олардың проблемаларын тудырды, оларды шешу айтарлықтай қаржылық шығындарды талап етті. «Майлы» тығыздағыштардан айырмашылығы, құрғақ «тығыздағыштарда жұмыс кезінде тығыздағыш жеңдер арасында тікелей байланыс болмайды және сәйкесінше жылу болмайды. Мақалада газ-динамикалық кезеңнің жұмыс принципі сипатталған. Атырау мұнай өңдеу зауытында орталықтан тепкіш компрессорды қалай жаңғырту жүргізілгені егжей-тегжейлі сипатталған, құрғақ газдинамикалық тығыздау жүйесінің қағидаттық схемасы, буферлік газ блогының қағидаттық схемасы, бөлгіш газ блогының қағидаттық схемасы келтірілген, майлы тығыздау жүйесімен салыстырғанда құрғақ газдинамикалық тығыздағыштарды пайдаланудың артықшылықтары келтірілген. Сондай-ақ, құрғақ газ-динамикалық тығыздау жүйесінің түйіндерінің жұмыс режимдерін бақылау жүйесі ұсынылған.

Кілтті сөздер: компрессор, қондырғы, тығыздау, схема, сенімділік, процесс, май, байланыс.

*L. A. Sadykova¹, S. V. Oleinikov², B. A. Sarguzhieva³, N. G. Buranova⁴

^{1,2,3,4}West Kazakhstan University of Innovation and Technology,

Republic of Kazakhstan, Uralsk.

Received 05.06.25.

Received in revised form 13.01.26.

Accepted for publication 27.02.26.

PROSPECTS FOR THE USE OF DRY GAS DYNAMIC SEALS ON COMPRESSOR UNITS AN OIL REFINERY

This article analyzes the prospects for the use of dry gas dynamic seals on centrifugal compressor units used in the oil and gas industry of Kazakhstan. The fundamental principles of managing such seals are considered, ensuring their reliable and safe operation on the CC-1 centrifugal compressor of the Atyrau Oil Refinery. Most centrifugal compressors were manufactured with oil-type mechanical seals. The problem with using traditional «oil» seals is the risk of overheating of the cartridges due to high circumferential speeds, especially if the pressure of the medium is high. Oil leaks created their own problems, the solution of which required significant financial costs. Unlike «oil» seals, in «dry» seals there is no direct contact between the sealing bushings during operation and, consequently, there is no heating. The article describes the principle of operation of the gas dynamic stage. It describes in detail how a centrifugal compressor was upgraded at the Atyrau Oil Refinery, provides a schematic diagram of the dry gas dynamic seal system, a schematic diagram of the buffer gas block, a schematic diagram of the separation gas block, and lists the advantages of using dry gas dynamic seals compared to an oil seal system. A system for monitoring the operating modes of the components of the dry gas dynamic sealing system is also proposed.

Keywords: compressor, unit, seal, circuit, reliability, process, oil, contact.

<https://doi.org/10.48081/BGQF1961>

***А. А. Сафарбаков¹, С. И. Олейник²,
Т. Т. Бекибаев³, У. К. Жапбасбаев⁴**

¹ТОО «Павлодартехэнерго»,
Республика Казахстан, г. Павлодар;

²ТОО «ЭНЭКО»,
Республика Казахстан, г. Павлодар;

^{3,4}НАО «Казахский национальный исследовательский
технический университет имени К.И. Сатпаева»,
Республика Казахстан, г. Алматы.

¹ORCID: <https://orcid.org/0009-0007-4104-3225>

²ORCID: <https://orcid.org/0009-0009-8007-7166>

³ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-7030-0015>

⁴ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-5973-5149>

*e-mail: safarbakov@mail.ru

ИССЛЕДОВАНИЕ ИЗМЕНЕНИЯ ЭКВИВАЛЕНТНОЙ ШЕРОХОВАТОСТИ ЭЛЕМЕНТОВ ТЕПЛОВОЙ СЕТИ ВО ВРЕМЕНИ

Исследования технического состояния тепловых сетей в периоде 2015–2025 годов, а также анализ архивных данных по проведению испытаний на гидравлические потери позволили установить связь и вывести устойчивую зависимость указанного коэффициента от времени эксплуатации. Поскольку за последние десятилетия технология подготовки сетевой воды на теплоисточниках г. Павлодара практически не изменялась, условия эксплуатации трубопроводов, выполненных по определенным схемам и из определенного материала, предполагают вполне предсказуемый результат по увеличению гидравлического сопротивления в течение времени. При разработке цифровых двойников систем теплоснабжения расчеты гидравлического режима могут выполняться не только с учетом экспериментально определённого гидравлического сопротивления, но и с использованием полученной зависимости. Использование этой зависимости может стать актуальным для снижения трудозатрат и экономии времени при

внедрении современных средств автоматизации. Функционал современного специализированного программного обеспечения обеспечивается за счет работы с массивами исходных данных, включающих в себя технические характеристики сети. Получить такие исходные данные, как эквивалентная шероховатость, по всем элементам сети методами, описанными в РД 34 РК.20.519-05 «Методические указания по испытаниям водяных тепловых сетей на гидравлические потери» и РД 153-34.1-20.526-00 «Методические указания по испытанию водяных тепловых сетей на гидравлические потери без нарушения режимов эксплуатации» - очень затратный и трудоемкий процесс. Предлагается для построения расчетных (перспективных) режимов и анализа текущих режимов работы тепловой сети формировать исходные данные с применением полученной зависимости коэффициента эквивалентной шероховатости от времени эксплуатации для тепловых сетей г. Павлодара.

Ключевые слова: тепловые сети, гидравлическое сопротивление, коэффициент эквивалентной шероховатости, гидравлический режим, степень износа.

Введение

Внедрение современных цифровых технологий в нашей стране является объективной необходимостью. Дальнейшая эксплуатация сетей централизованного теплоснабжения городов, особенно, если учесть высокую степень их износа, не представляется возможной без цифровизации процессов получения объективной информации об объекте эксплуатации. Одной из важных базовых составляющих цифровизации является построение цифрового двойника объекта управления. В силу сложности и важности этих задач, Государство выделяет средства в виде грантов на выполнение работ в этом направлении. В соответствии с поставленными задачами разработка необходимого программного обеспечения ведется сотрудниками Сатпаев Университета г. Алматы. Для получения характеристик существующей тепловой сети города Павлодара с целью построения цифрового двойника привлечены ТОО «НПФ СКЭП», ТОО «ПАВЛОДАРТЕХЭНЕРГО», ТОО «Павлодарские тепловые сети».

Цифровой двойник теплосети представляет собой виртуальную модель реальной системы теплоснабжения города. Его основная цель – обеспечить точное отображение структуры, параметров и текущего состояния теплосети, а также смоделировать ее работу в различных условиях. Такой инструмент позволяет анализировать поведение системы без риска для реальных объектов,

прогнозировать последствия изменений и принимать более обоснованные управленческие решения. Для наглядности и удобства пользования цифровой двойник совмещается с трёхмерным макетом промышленных зон и городской застройки (с ГИС-системой), после чего конечный продукт обретает следующий функционал:

1) Моделирование и расчет режимов работы теплосети: гидравлический расчет расходов теплоносителя в трубопроводах на основании действующей схемы сети; расчет тепловых режимов с учетом фактических нагрузок потребителей и тепловых потерь.

2) Взаимодействие с базами данных: хранение и обработка информации о сетевых элементах: трубопроводах, насосных станциях, тепловых пунктах, задвижках, регуляторах и др. с обязательной пространственной привязкой элементов системы.

3) Аналитические инструменты: выявление «узких мест» сети; анализ сценариев развития теплосети, включая подключение новых потребителей; построение пьезометрических графиков и других расчетных схем для оценки инженерных возможностей сети и её надежности.

4) Модули наладочного и поверочного расчетов:

Наладочный расчет позволяет рассчитать режим работы теплосети исходя из заданных тепловых нагрузок потребителей. Используется для проверки соответствия фактических параметров проектным, а также для выбора оптимальных режимов эксплуатации.

Поверочный расчет применяется при фиксированных настройках регулирующих устройств у потребителей. Позволяет оценить устойчивость работы системы и оценить соответствие настроек в реальных условиях эксплуатации.

5) Прогнозирование параметров работы теплосети на основе машинного обучения и накопленных данных; разработка рекомендаций по оптимизации режимов работы и снижению издержек.

6) Визуализация и пользовательский интерфейс: наглядное отображение структуры теплосети и ее режимов в ГИС-системе; возможность редактирования и построения новых конфигураций сети в процессе её развития. Экспорт расчетных результатов в текстовые и табличные форматы.

Материалы и методы

Одной из самых важных физических характеристик участков тепловой сети является их гидравлическое сопротивление. Расчетную величину гидравлического сопротивления получают исходя из конструкции и геометрических размеров трубопровода. Гидравлическое сопротивление трубопровода в процессе эксплуатации имеет свойство увеличиваться. Это

происходит по различным причинам и с разной степенью интенсивности в зависимости от условий эксплуатации и характеризуется *эквивалентной шероховатостью*. В физическом смысле *коэффициент эквивалентной шероховатости* характеризует эквивалентный размер неровностей (выступов) на внутренней поверхности стенки трубы, которые из-за нарушения ламинарности потока в пристеночном слое жидкости вносят сопротивление, эквивалентное сопротивлению фактической, сложной по структуре поверхности [1; 2; 3; 4; 5]. Участки сети, которые не подвергались полной или частичной замене, показывают рост эквивалентной шероховатости от времени эксплуатации. Частичная или полная замена трубы на новую работает на понижение эквивалентной шероховатости. Это значение используется для упрощения расчетов, так как позволяет заменить сложное распределение микронеровностей на одно, более простое. Эквивалентная шероховатость определяется экспериментальным путем с использованием эмпирических формул.

Современные исследования в области идентификации гидравлических сопротивлений, в том числе на участках сети с промежуточными отборами или врезками, подтверждают сложность и важность точного определения этих параметров для адекватного моделирования [6].

Применительно к тепловым сетям для определения эквивалентной шероховатости для каждой ветви сети производятся испытания на гидравлические потери. Порядок выполнения испытаний, обработка результатов испытаний регламентируются РД 34 РК.20.519-05 «Методические указания по испытаниям водяных тепловых сетей на гидравлические потери» [7]. При этом следует указать, что таким образом могут быть получены результаты в основном для магистральных сетей и при значительных затратах ресурсов и в первую очередь времени.

Для экспериментального обследования тепловых сетей применяется так же методология, изложенная в РД 153-34.1-20.526-00 «Методические указания по испытанию водяных тепловых сетей на гидравлические потери без нарушения режимов эксплуатации» [8]. Данные Методические указания устанавливают содержание и порядок проведения работ по определению эксплуатационных гидравлических потерь в трубопроводах водяных тепловых сетей и действуют наряду с РД 34.20.519-97 «Методические указания по испытанию водяных тепловых сетей на гидравлические потери» [9]. Выполнение этих испытаний не менее проблематично, поскольку возникают технические ограничения в части организации циркуляции теплоносителя в отдельно взятом квартальном ответвлении с обеспечением установившегося давления на источнике (ТЭЦ). Судя по количеству и разветвленности тепловых сетей, на реализацию этих

испытаний требуется достаточно большое количество ресурсов и времени. Как раз того времени, которое сегодня необходимо в первую очередь на восстановительные ремонты и подготовку сетей к отопительному периоду.

Таким образом, необходимость экспериментального определения гидравлического сопротивления для каждого участка тепловой сети в плане затрат ресурсов и времени становится большим препятствием на пути оперативного получения цифрового двойника тепловой сети. Чем более точные значения гидравлических сопротивлений мы собираемся получить, тем больше времени будет затрачено на эксперименты, а результаты, полученные в начале пути, потеряют свою актуальность.

Для выполнения инженерных расчетов гидравлического режима РД 34.20.519-97 предусматривает использование значений эквивалентной шероховатости в зависимости от сроков эксплуатации трубопровода (таблица 1) [10].

Таблица 1

Срок эксплуатации, лет	Коэффициент эквивалентной шероховатости λ , м	
	по подающему трубопроводу	по обратному трубопроводу
До 5	$1,5 \cdot 10^{-3}$	$1,0 \cdot 10^{-3}$
Св. 5 до 10	$3,0 \cdot 10^{-3}$	$2,0 \cdot 10^{-3}$
Св. 10 до 15	$5,0 \cdot 10^{-3}$	$3,5 \cdot 10^{-3}$
Св. 15 до 20	$6,0 \cdot 10^{-3}$	$4,0 \cdot 10^{-3}$
Св. 20	$10,0 \cdot 10^{-3}$	$8,0 \cdot 10^{-3}$

На стадии проектирования данные Методические указания допускают некую ошибку с завышением гидравлического сопротивления. За несколько лет эксплуатации реальное значение гидравлического сопротивления и шероховатости достигнут значений, заложенных в проект, т.е. на все эти годы эксплуатации расчетный гидравлический режим будет обеспечен. Сам период времени при этом не зависит от проектанта, он определяется условиями эксплуатации.

В эксплуатации мы имеем дело с сетями, которые создавались не один десяток лет. За это время созданы новые участки, произведены капитальные ремонты с заменой трубопроводов, выполнены модернизации, незамененные трубопроводы заросли отложениями и потеряли пропускную способность и т.д.

Таким образом, если для целей проектирования использование значений коэффициентов эквивалентной шероховатости из РД 34.20.519-97 даёт приемлемый результат, то для создания цифрового двойника действующей тепловой сети значения эквивалентной шероховатости из РД 34.20.519-97 не применимы. При попытках подставить эти значения в расчет режима действующей теплосети получены результаты, которые критически отличаются от показателей режима, получаемых в ходе измерений (натурных испытаний). Для целей построения цифрового двойника действующей тепловой сети использование значений коэффициентов эквивалентной шероховатости из РД 34.20.519-97 не приемлемо ввиду низкой сходимости результатов.

Вышеозначенные выводы послужили причиной дальнейших исследований взаимосвязи между таким важным показателем качества, как коэффициент эквивалентной шероховатости участка тепловой сети, и продолжительностью его эксплуатации.

Результаты и обсуждение

В ходе работы над цифровой моделью согласно РД 34.20.519-05 были выполнены испытания на гидравлическое сопротивление участков тепловых сетей [11]. По результатам испытаний получено несколько значений коэффициентов шероховатости для различных трубопроводов с различными сроками эксплуатации. Поскольку трубопроводы со сроками эксплуатации менее 25 лет на момент выполнения данной работы практически отсутствуют, то для построения характеристики были использованы архивные отчеты ТОО «Павлодартехэнерго» за три десятилетия выполнения аналогичных измерений и расчетов для тепловых сетей города Павлодара. Полученные таким образом значения коэффициентов шероховатости в привязке к срокам эксплуатации не превысили значений, рекомендованных РД 34.20.519-97 «Методические указания по испытанию водяных тепловых сетей на гидравлические потери». А в предварительном гидравлическом расчете режима сети, для трубопроводов с длительными сроками эксплуатации они оказались существенно ниже. Попутно был сделан вывод о том, что режим водоподготовки на всех трех источниках тепла г.Павлодара достаточно сбалансирован, и эксплуатация ведется на соответствующем уровне.

Средние значения коэффициентов эквивалентной шероховатости от срока эксплуатации трубопровода, полученные по результатам испытаний, приведены в Таблице 2.

Аппроксимированные зависимости коэффициента шероховатости и его годового прироста от срока эксплуатации трубопровода, имеющие нормальное распределение отклонений от истинного значения, приведены на рисунке 1.

Таблица 2

Срок эксплуатации	Среднеарифметическое значение K_{Σ}	Годовой прирост
0	0,5	0,5
3	1,9	0,41
5	2,4	0,25
9	2,85	0,12
10	2,85	0,09
11	2,9	0,08
16	3,1	0,07
22	3,6	0,07
30	3,85	0,06
32	4,37	0,06
38	4,55	0,05
43	4,78	0,05

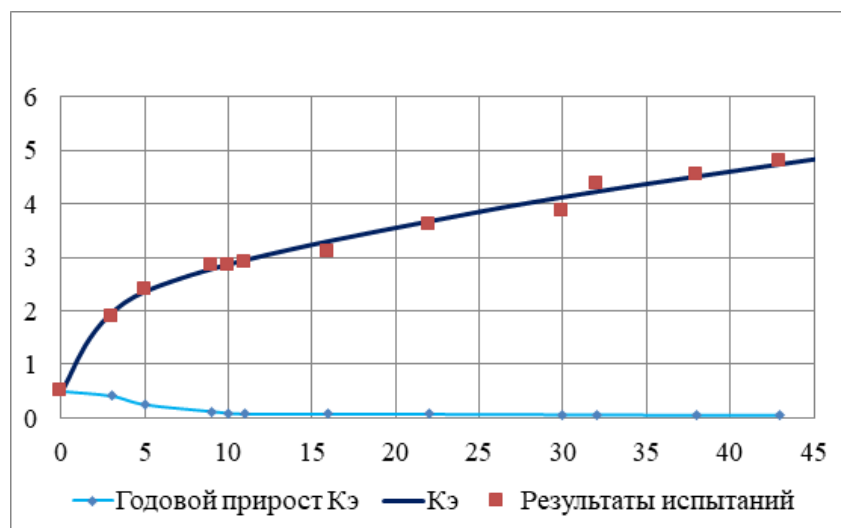


Рисунок 1 – Зависимость коэффициента эквивалентной шероховатости и величины его годового прироста от срока эксплуатации.

Анализ значений эквивалентной шероховатости испытанных участков тепловых сетей показал, что в большинстве случаев они лежат в доверительном интервале от значений, получаемых по аппроксимированной зависимости коэффициента шероховатости и его годового прироста от срока эксплуатации этих участков тепловых сетей. Имеющиеся отклонения от аппроксимированных значений объясняются скрытыми дефектами и отклонениями от паспортных данных.

Выводы

Результаты проведенных исследований за последние 10 лет и архивные данные о результатах исследований 30-летней давности в целом описывают усредненную характеристику зависимости коэффициента эквивалентной шероховатости от времени эксплуатации тепловой сети. Частные расхождения могут быть объяснены объективными обстоятельствами, повлиявшими на точность измерений и поддержания режима во время измерений. Использование этой зависимости может стать актуальным для снижения трудозатрат и экономии времени при внедрении современных средств автоматизации в области централизованного теплоснабжения. Функционал современных специализированных программных средств, применительно к проектированию и эксплуатации тепловых сетей, обеспечивается, в том числе, и за счет работы с массивами исходных данных, включающих в себя гидравлические сопротивления и коэффициенты эквивалентной шероховатости участков сети. Получить такие исходные данные, как эквивалентная шероховатость, по всем элементам сети методами, описанными в РД 34 РК.20.519-05 «Методические указания по испытаниям водяных тепловых сетей на гидравлические потери» и РД 153-34.1-20.526-00 «Методические указания по испытанию водяных тепловых сетей на гидравлические потери без нарушения режимов эксплуатации» - очень затратный и трудоемкий процесс. Предлагается для построения расчетных (перспективных) режимов и анализа текущих режимов работы тепловой сети формировать исходные данные с применением полученной зависимости коэффициента эквивалентной шероховатости от времени эксплуатации. Применительно к тепловым сетям г.Павлодара, для ведения инженерных расчетов гидравлического режима, наряду с применением утвержденных методик, с приемлемой точностью может использоваться полученная зависимость коэффициента эквивалентной шероховатости от времени эксплуатации.

Финансирование

Работа выполнена при поддержке Комитета науки Министерства науки и высшего образования Республики Казахстан (грант № BR24992907, 2024–2026 гг.).

Список использованных источников

- 1 **Александрович, С.** Шероховатость стенок трубопровода: типы и влияние [Электронный ресурс] Режим доступа <https://www.nektonnasos.ru/articles/sherokhovatost-stenok>
- 2 **Liu, Y., Du, Q., Luo, P., Zou, P., He, Z.** (2020) «Pipe resistance coefficients identification of water networks considering solvable conditions». Canadian Journal of Civil Engineering. – 48(9). – 2020. – P. 1223-1230. – <https://doi.org/10.1139/cjce-2019-0680>.
- 3 **Булгаков, И. С.** Исследование зависимости коэффициента гидравлического трения жидкости (λ) от числа Рейнольдса (Re) применительно к гидро-приводу / И. С. Булгаков, И. А. Секисова, Е. П. Терехин // Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал). – 2016. – № 5. – С. 5–10.
- 4 **Альштуль, Д. А.** Гидравлические сопротивления трубопроводов / А. Д. Альштуль, В. И. Калицун – М. : Издательство литературы по строительству, 1964. – 175 с.
- 5 **Альштуль, А. Д.** Гидравлика и аэродинамика (основы механики жидкости) / А. Д. Альштуль, П. Г. Киселев. – М. : Стройиздат, 1965. – 275 с.
- 6 **Bekibayev, T. T.** Identification of Resistance Coefficients for Section of Water Pipeline Network in Case of Intermediate Withdrawals or Injections of Water // Engineered Science. – 2025. – Vol. 36. – P. 1583. – <https://dx.doi.org/10.30919/es1583>.
- 7 РД 34 РК.20.519-05 «Методические указания по испытаниям водяных тепловых сетей на гидравлические потери».
- 8 РД 153-34.1-20.526-00 «Методические указания по испытанию водяных тепловых сетей на гидравлические потери без нарушения режимов эксплуатации».
- 9 РД 34.20.519-97 «Методические указания по испытанию водяных тепловых сетей на гидравлические потери»
- 10 **Яковлев, Б. В., Яковлев, Ю. Б.** Теплофикация и тепловые сети Учебное пособие по практическим занятиям и курсовому проектированию для студентов специальности 43.01.04 – Тепловые электрические станции 43.01.05 – Промышленная теплоэнергетика. – Минск, 2003.
- 11 **Морозов, М. А.** Расчетно-экспериментальные исследования гидравлических характеристик трубопроводов систем теплоснабжения с учетом степени гидрофобности функциональных поверхностей 05.14.04 – Промышленная теплоэнергетика Диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук Научный руководитель д.т.н. Волков А.В. – М., 2016.

References

- 1 **Aleksandrovich, S.** Sherohovatos't' stenok truboprovoda: Tipy i vliyanie [Roughness of Pipe Internal Surface: Types and Effects] [Electronic resource] Available at: <https://www.nektonnasos.ru/articles/sherokhovatost-stenok>
- 2 **Liu, Y., Du, Q., Luo, P., Zou, P., He, Z.** «Pipe resistance coefficients identification of water networks considering solvable conditions». Canadian Journal of Civil Engineering. – 48(9). – 2020. – P. 1223–1230. – <https://doi.org/10.1139/cjce-2019-0680>.
- 3 **Bulgakov, I. S.** Issledovanie zavisimosti koeffitsienta gidravlicheskogo treniya zhidkosti (λ) ot chisla Rejnol'dsa (Re) primenitel'no k gidro-privodu [Study of the dependence of the coefficient of hydraulic friction of the fluid (λ) on the Reynolds number (Re) in relation to the hydraulic drive] / I. S. Bulgakov, I. A. Sekisova, E. P. Terekhin // Mining Information and Analytical Bulletin (Scientific and Technical Journal). – 2016. – № 5. – P. 5–10.
- 4 **Al'shtul', D. A.** Gidravlicheskie soprotivleniya truboprovodov [Pipelines hydraulic resistance] / A. D. Al'shtul', V. I. Kalicun. – Moscow : Izdatel'stvo literatury po stroitel'stvu [Construction Literature Publishers], 1964. – 175 p.
- 5 **Al'tshul', A. D.** Gidravlika i aerodinamika (osnovy mekhaniki zhidkosti) [Hydraulics and Aerodynamics (Fluid Mechanics Basics)] / A. D. Al'tshul', P. G. Kiselev. – Moscow : Strojizdat, 1965. – 275 p.
- 6 **Bekibayev, T. T.** Identification of Resistance Coefficients for Section of Water Pipeline Network in Case of Intermediate Withdrawals or Injections of Water // Engineered Science. – 2025. – Vol. 36. – P. 1583. – <https://dx.doi.org/10.30919/es1583>.
- 7 RD 34 RK.20.519-05 «Metodicheskie ukazaniya po ispytaniyam vodyanyh teplovyh setej na gidravlicheskie poteri» [Guidelines of water heating networks tests for hydraulic losses].
- 8 RD 153-34.1-20.526-00 «Metodicheskie ukazaniya po ispytaniyu vodyanyh teplovyh setej na gidravlicheskie poteri bez narusheniya rezhimov ekspluatatsii» [Guidelines of water heating networks tests for hydraulic losses without violation of operating modes].
- 9 RD 34.20.519-97 «Metodicheskie ukazaniya po ispytaniyu vodyanyh teplovyh setej na gidravlicheskie poteri» [Guidelines of water heating networks tests for hydraulic losses]
- 10 **Yakovlev, B. V., Yakovlev, Yu. B.** Teplofikatsiya i teplovye seti Uchebnoe posobie po prakticheskim zanyatiyam i kursovomu proektirovaniyu dlya studentov special'nosti 43.01.04 – Teplovye elektricheskie stancii 43.01.05 – Promyshlennaya teploenergetika [Heating and Heating Networks. Practical training manual

and course design for students of specialties 43.01.04 - Thermal power plants 43.01.05 - Industrial heat engineering] – Minsk, 2003.

11 **Morozov, M. A.** Raschetno-eksperimental'nye issledovaniya gidravlicheskikh harakteristik truboprovodov sistem teplosnabzheniya s uchetom stepeni gidrofobnosti funktsional'nykh poverhnostej [Design and experimental studies of heat supply pipelines systems hydraulic characteristics of taking into account the degree of functional surfaces hydrophobicity] 05.14.04 – Industrial Heat Power Engineering, Thesis for the degree of candidate of technical sciences, Scientific supervisor d.t.n. Volkov A.V. – Moscow, 2016

Поступило в редакцию 12.01.26.

Поступило с исправлениями.

Принято в печать 27.02.26.

A. A. Сафарбаков¹, С. И. Олейник², Т. Т. Бекибаев³, У. К. Жапбасбаев⁴

¹«Павлодартехэнерго» ЖШС,

Қазақстан Республикасы, Павлодар қ.

²«ЭНЭКО» ЖШС,

Қазақстан Республикасы, Павлодар қ.

^{3,4}Қ. И. Сәтбаев атындағы Қазақ ұлттық техникалық зерттеу университеті,

Қазақстан Республикасы, Алматы қ.

12.01.26 ж. баспаға түсті.

ж. түзетулерімен түсті.

27.02.26 ж. басып шығаруға қабылданды.

УАҚЫТ БОЙЫНША ЖЫЛУ ЖЕЛІСІ ЭЛЕМЕНТТЕРІНІҢ БАЛАМАЛЫ КЕДІР-БҰДЫРЛЫҒЫНЫҢ ӨЗГЕРУІН ЗЕРТТЕУ

2015–2025 жылдар кезеңінде жылу желілерінің техникалық жай-күйін зерттеу, сондай-ақ гидравликалық ысырапқа сынақтар жүргізу бойынша мұрағаттық деректерді талдау байланыс орнатуға және көрсетілген коэффициенттің пайдалану уақытына тұрақты тәуелділігін шығаруға мүмкіндік берді. Соңғы онжылдықта Павлодар қаласының жылу көздеріндегі желілік суды дайындау технологиясы іс жүзінде өзгермегендіктен, белгілі бір схемалар бойынша және белгілі бір материалдан орындалған құбырларды пайдалану шарттары уақыт ішінде гидравликалық кедергіні ұлғайту жөнінде толық болжамды нәтижені болжайды. Жылумен жабдықтау жүйелерінің

цифрлық қосарларын әзірлеу кезінде гидравликалық режимнің есептеулері эксперименттік белгілі бір гидравликалық кедергіні ескере отырып ғана емес, алынған тәуелділікті пайдалана отырып та орындалуы мүмкін. Бұл тәуелділікті пайдалану қазіргі заманғы автоматтандыру құралдарын енгізу кезінде еңбек шығындарын азайту және уақытты үнемдеу үшін өзекті болуы мүмкін. Қазіргі заманғы мамандандырылған бағдарламалық қамтамасыз етудің функционалы желінің техникалық сипаттамаларын қамтитын бастапқы деректер массивтерімен жұмыс істеу есебінен қамтамасыз етіледі. Баламалы кедір-бұдырлық сияқты бастапқы деректерді желінің барлық элементтері бойынша РД 34 РК.20.519-05 «Су жылу желілерін гидравликалық ысырапқа сынау жөніндегі әдістемелік нұсқаулар» және РД 153-34.1-20.526-00 «Су жылу желілерін пайдалану режимдерін бұзбай гидравликалық ысырапқа сынау жөніндегі әдістемелік нұсқаулар» сипатталған әдістермен алу - өте шығынды және көп еңбекті қажет ететін процесс. Есептік (перспективалық) режимдерді құру және жылу желісі жұмысының ағымдағы режимдерін талдау үшін Павлодар қаласының жылу желілері үшін баламалы кедір-бұдырлық коэффициентінің пайдалану уақытына алынған тәуелділігін қолдана отырып, бастапқы деректерді қалыптастыру ұсынылады

Кілтті сөздер: жылу желілері, гидравликалық кедергі, баламалы кедір-бұдырлық коэффициенті, гидравликалық режим, тозу дәрежесі.

A. A. Safarbakov¹, S. I. Oleinik², T. T. Bekibayev³, U. K. Zhabasbayev⁴

¹Pavlodartekhenenergo LLP,

Republic of Kazakhstan, Pavlodar;

²ENEKO LLP, t

Republic of Kazakhstan, Pavlodar;

^{3,4}Satbayev University,

Republic of Kazakhstan, Almaty.

Received 12.01.26.

Received in revised form 10.11.25.

Accepted for publication 27.02.26.

EQUIVALENT ROUGHNESS CHANGE STUDY FOR HEATING NETWORK ELEMENTS IN TIME

Studies of the technical condition of heating networks in the period 2015–2025, as well as the analysis of archival data on testing for hydraulic losses, made it possible to establish communication and derive a stable dependence of this coefficient on the operating time. Since over the past decades, the technology of network water treatment at heat sources in Pavlodar has practically not changed, the operating conditions of pipelines made according to certain schemes and from a certain material suggest a completely predictable result in increasing hydraulic resistance over time. When developing digital twins of heat supply systems, hydraulic mode calculations can be carried out not only taking into account experimentally determined hydraulic resistance, but also using the resulting relationship. The use of this dependence may become relevant to reduce labor costs and save time when introducing modern automation tools. The functionality of modern specialized software is provided by working with arrays of initial data, including the technical characteristics of the network. Obtain such initial data as equivalent roughness for all network elements by methods described in RD 34 RK.20.519-05 «Methodological Guidelines for Testing Water Heating Networks for Hydraulic Losses» and RD 153-34.1-20.526-00 «Methodological Guidelines for Testing Water Heating Networks for Hydraulic Losses without Violation of Operating Modes» is a very costly and laborious process. It is proposed to generate initial data with application of obtained dependence of coefficient of equivalent roughness on operation time for heat networks of Pavlodar for construction of design (perspective) modes and analysis of current modes of heat network operation.

Keywords: heating networks, hydraulic resistance, coefficient of equivalent roughness, hydraulic mode, degree of wear.

МРТНТИ 44.09.39

<https://doi.org/10.48081/BGQF1962>

***Я. Сергеевс¹, Г. Ж. Сейтенова², Р. М. Дюсова³**

^{1,3}Торайғыров университет,

Республика Казахстан, г. Павлодар;

²Евразийский национальный университет имени Л. Н. Гумилева,

Республика Казахстан, г. Астана.

¹ORCID: <https://orcid.org/0009-0009-2090-9143>

²ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-6202-3951>

³ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-3083-5255>

*e-mail: sergeevs_yakobs@mail.ru

ПРИМЕНЕНИЕ ПИНЧ-АНАЛИЗА КАК МЕТОДА ПОВЫШЕНИЯ ЭНЕРГОЭФФЕКТИВНОСТИ НЕФТЕПЕРЕРАБАТЫВАЮЩИХ ЗАВОДОВ

Статья посвящена исследованию применения методологии пинч-анализа для повышения энергоэффективности нефтеперерабатывающих заводов (НПЗ). В условиях роста цен на энергоносители и ужесточения экологических требований пинч-анализ представляет собой мощный инструмент оптимизации энергопотребления, позволяющий снизить операционные затраты и уменьшить углеродный след предприятий. Методология основана на тепловой интеграции процессов, что особенно актуально для НПЗ, являющихся одними из крупнейших потребителей энергии. В статье проведен обзор современных научных публикаций, демонстрирующих эффективность пинч-анализа на различных технологических объектах. Рассмотрены ключевые преимущества метода, включая снижение энергопотребления на 15–45 %, сокращение затрат на топливо и уменьшение выбросов парниковых газов. Особое внимание уделено барьерам внедрения пинч-анализа на постсоветском пространстве, где многие предприятия были спроектированы без учета современных требований к энергоэффективности.

Приведены примеры успешного применения пинч-анализа на российских и зарубежных НПЗ, такие как модернизация теплообменных сетей, интеграция органических циклов Ренкина

(ORC) и оптимизация водопотребления. Отмечено, что наибольший экономический эффект достигается на установках первичной переработки нефти и каталитического крекинга, где тепловая интеграция позволяет рекуперировать до 67,5 МВт энергии.

Статья раскрывает потенциал пинч-анализа в контексте устойчивого развития, включая снижение эмиссий CO₂ и внедрение возобновляемых источников энергии. Для дальнейшего развития метода рекомендуется активное использование современных программных инструментов, таких как Aspen Energy Analyzer, и проведение прикладных исследований в области гибридных энергетических систем.

Ключевые слова: пинч-анализ, энергоэффективность, нефтеперерабатывающие заводы, тепловая интеграция, рекуперация тепла.

Введение

Рост цен на энергоносители, ужесточение экологических требований и необходимость повышения конкурентоспособности промышленных предприятий обуславливают актуальность поиска эффективных методов оптимизации энергопотребления.

Одним из наиболее результативных подходов является методология пинч-анализа, позволяющая минимизировать затраты на энергоснабжение за счет оптимизации систем теплообмена и интеграции процессов. Нефтеперерабатывающие заводы, являясь одними из крупнейших потребителей энергии, обладают высоким потенциалом для применения методов пинч-анализа. В настоящей статье рассматривается мировой опыт применения данной технологии в нефтепереработке, анализируются примеры успешных внедрений, а также оценивается перспективность использования пинч-методов на предприятиях постсоветского пространства.

Утверждение о проблеме

Несмотря на доказанную эффективность пинч-анализа в мировой практике, его применение в нефтеперерабатывающей отрасли на постсоветском пространстве остаётся ограниченным. Большинство предприятий были спроектированы в условиях низких цен на энергию и минимального внимания к вопросам энергоэффективности. Это привело к широкому распространению нерациональных схем теплоснабжения, недостаточной интеграции процессов и высоким удельным расходам топлива. В современных экономических условиях отсутствие эффективной теплоинтеграции становится фактором, препятствующим снижению

операционных расходов и достижению экологических целей. Применение пинч-анализа способно устранить эти барьеры за счёт реконфигурации тепловых сетей и оптимизации технологических потоков.

Частой практикой, встречающейся на ряде нефтеперерабатывающих заводах, является нерациональное использование энергии, недостаточная теплоинтеграция между отдельными процессами. Необходимо принимать во внимание, что практически все крупные предприятия нефтеперерабатывающей отрасли проектировались 50-70 лет назад в совершенно других экономических условиях.

В условиях рыночной экономики одной из основных статей расхода предприятия является энергия. В этой связи методология пинч-анализа позволяет оценить технологические схемы существующих предприятий на предмет эффективности и соответствия требуемым экономическим показателям.

В статье на основании приведенных источников приведена возможность использования методов пинч-анализа по улучшению технико-экономических показателей предприятия по следующим направлениям:

- снижение потребления энергоресурсов;
- снижение потребления топлива;
- сокращение эмиссий;
- улучшение методов и средств контроля.

На рисунке 1 приведена статистика по количеству проведенных исследований в развивающихся странах по теме пинч-анализа в разрезе по странам проведения в период 2008-2017 гг. Лидерами в проведении пинч-анализа среди выборки являются Китай, Малайзия и Индия, что связано с активным развитием промышленности в этих странах и энергосберегающих технологиях. Примечательно, что почти все из этих исследований проведены университетами в этих странах.

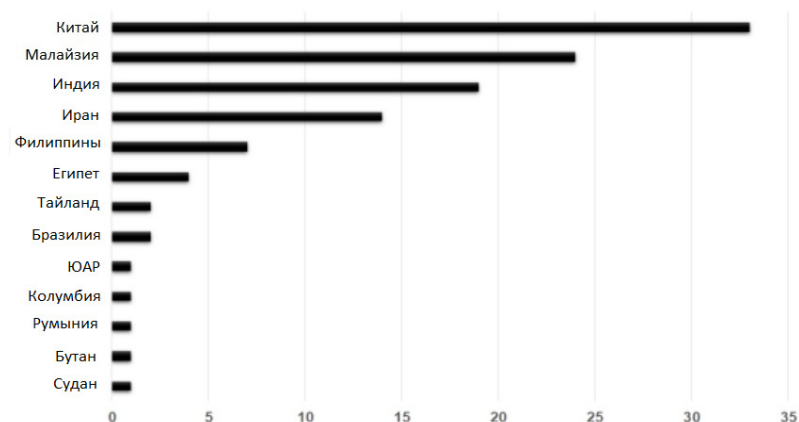


Рисунок 1 – Количество исследований пинч-анализа в развивающихся странах (2007-2018 гг.)

Материалы и методы

Методами изучения является литературный обзор. Пинч-анализ также известен как процесс интеграции, тепловая интеграция, энергетическая интеграция или пинч-технология. Исходные данные для процесса представляются в виде набора энергетических потоков или зависимостей тепловой нагрузки (кВт) от температуры ($^{\circ}\text{C}$). Эти данные объединяются для всех потоков на предприятии, чтобы дать композитные кривые, одну для всех горячих потоков (отдающих тепло) и одну для всех холодных потоков (требующих тепло). Точка наибольшего сближения горячей и холодной составной кривой называется точкой пинча (или просто пинч). Для горячей и для холодной составной кривой температура пинча будет индивидуальна. В области пинча на процесс проектирования оптимальной системы теплообмена накладываются наибольшие ограничения. Таким образом, найдя эту точку и начав проектирование с неё, можно достичь целевых энергетических значений с помощью системы теплообменников путём передачи теплоты между горячими и холодными потоками в двух независимых подсистемах, выше и ниже пинча. На практике во время проведения пинч-анализа существующего процесса довольно часто существует перекрестный теплообмен между горячим потоком с температурой выше пинча и холодным потоком ниже пинча. Устранение подобных связей и создание альтернативных, позволяет улучшить процесс и достичь энергетических целей [1].

Типичная пинч-диаграмма приведена на рисунке 2.

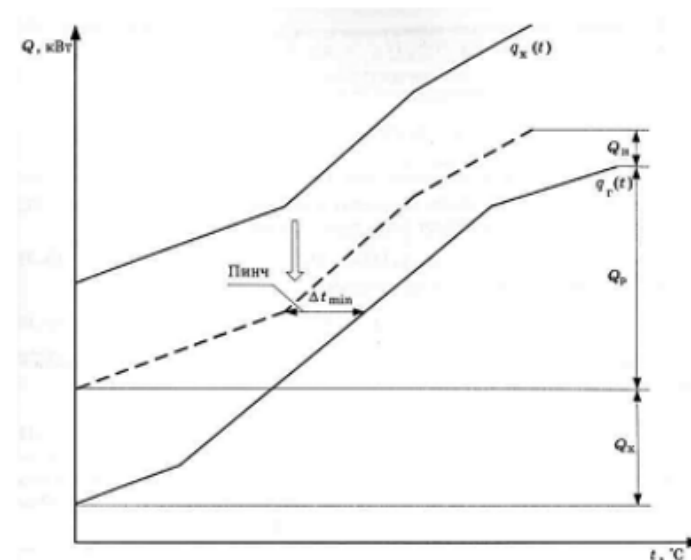


Рисунок 2 – Пинч-диаграмма

Результаты и обсуждение

Современные исследования в области энергетики и теплотехники активно используют методологию пинч-анализа для оптимизации процессов интеграции и повышения эффективности энергосистем. В данной работе представлен обзор ключевых публикаций, охватывающих различные аспекты применения данного подхода.

Концепция пинча с рекуперацией тепла была независимо открыта и разработана Хохманном и, в меньшей степени, Хуаном и Элсхоутом. В статье Яромира Клемеса и соавторов [2] описаны современные подходы к интеграции процессов на основе пинч-анализа. Однако основными пионерами пинча с рекуперацией тепла были Линхофф и Флауэр. Важно упомянуть, что некоторые из термодинамических принципов уже были представлены Линхоффом в его диссертации на степень магистра наук. Основная идея заключалась в том, чтобы нарисовать отдельные общие требования к нагреву и общему охлаждению процесса кумулятивным образом с использованием диаграммы «температура – энтальпия», в основном известной как составные кривые. Гундерсен отмечает, что подобные графики

ранее использовались проектировщиками низкотемпературных процессов, таких как разделение воздуха (компанией Linde AG в Германии), для проектирования многопоточных теплообменников. Авторами отмечается, что на этапах разработки методики пинч-анализа Линнхофф и его коллеги уделяли большое внимание вопросам модернизации сетей теплообмена. Одной из важнейших концепций, вытекающих из этой ранней работы, была необходимость избегать любого теплообмена через точку пинч. Другой очень ранней концепцией была идея эффективности площади, т. е. $\Delta Q/\Delta A$. Эти две концепции с тех пор применялись много раз для сравнения ориентировочной общей экономической эффективности различных вариантов модернизации. Известно, что всякий раз, когда тепло передается через точку пинч, возникает неэффективность, что препятствует достижению целевых показателей. Таким образом, для достижения целевых показателей теплоноситель должен использоваться только выше точки Пинч, а хладагент – ниже точки пинч. Большая часть усилий по методам анализа модернизации с того времени была направлена на реализацию концепции выявления и устранения теплообмена через точку пинча. Авторы отмечают, что данный метод продолжает развиваться, особенно в контексте устойчивого развития и энергоэффективности. Интеграция процессов на основе пинч-анализа существует уже более 40 лет и продолжает совершенствоваться. Исследование подчеркивает важность учета новых промышленных тенденций, таких как циркулярная экономика и снижение выбросов углерода, для повышения эффективности использования энергии.

В работе авторов Чэнтянь Цуя и Цзиньшэн Суня [3] рассматривалось применение метода пинч-анализа на установке первичной переработки нефти. Данная работа выделяется тем, что рассмотрена технологическая схема верхнего уровня. В этом исследовании представлен пример трех отдельных установок первичной переработки нефти на одном и том же нефтеперерабатывающем заводе, с различными характеристиками сырья и рабочими целями. Конкретные усилия заключались в том, чтобы максимизировать рекуперацию энергии более масштабной системы (всех трех комплексов первичной переработки нефти), также состоящей из подсистем (сети теплообменников). В поисках возможностей проектирования связей между различными подсистемами были проанализированы большие составные кривые (ГКК) для согласования подходящих тепловых каскадов через взаимосвязи между подсистемами теплообменников. В качестве вывода Чэнтянь Суй и Цзиньшэн Сун отмечают, что большое количество энергии может быть рекуперировано за счет правильного согласования тепловых каскадов и связи между отдельными технологическими установками.

Методы пинч-анализа широко применяются на энергетических объектах нефтеперерабатывающих заводов, таких как тепловые насосы, комбинированные системы производства тепла и электроэнергии или органические циклы Ренкина (ORC), которые могут быть оптимально интегрированы в технологический процесс [4]. ORC преобразует низкотемпературное отходящее тепло (например, 100-200°C) в электричество. Тем не менее, интеграция органических циклов Ренкина требует продуманного дизайна для обеспечения надлежащей интеграции.

Использование методов пинч-анализа применительно к технологиям ORC заключалось в определении потоков, наиболее подходящих для полезной утилизации энергии. Так называемая большая составная кривая используется для интегрирования ORC, чтобы обеспечить правильное размещение при рассмотрении всего процесса. Правильно интегрированный ORC, использующий отходящее тепло в качестве источника тепла, должен работать ниже точки пинча, т.е. ORC забирает тепло ниже точки пинча и преобразует его часть в электричество, а оставшееся тепло рассеивается в окружающую среду. Эта методология подчеркивает повышение общей энергетической эффективности процесса в первую очередь за счет рекуперации тепла перед использованием (реального) отработанного тепла в ORC.

Удобство композитных кривых для анализа энергетических систем отмечалось множеством исследователей. Группой авторов Дяньлян Фу, Гуйсян Лу, Хуэйцзюань Су, Яньхуа Лай, Линь Лу, Чжэнь Дун, Минсинь Лю опубликована научная работа на тему «Расширенный комплексный графический инструмент со смещенными температурами потока для эффективного проектирования экономически эффективных сетей теплообменников» [5]. Авторами разработан графический инструмент для оптимизации сетей теплообменников с применением среды математического моделирования Matlab. Авторы объединили четыре типа данных потока, включая температуру, энергию, расход теплоемкости и коэффициент теплопередачи, специально реализованные пятью независимыми и взаимосвязанными подграфиками.

Нефтепереработка является энергоемкой отраслью. Среди основных установок-потребителей энергии, помимо установки первичной переработки нефти, можно выделить установку каталитического крекинга. Процесс каталитического крекинга является экзотермическим, со значительным выделением теплоты. Полезное использование этого тепла является приоритетной задачей при теплоинтеграции установки каталитического крекинга и смежных установок. Авторами Сяо Лю, Чэнтянь Цуй, Цзе Хэ, Цзиньшэн Сунь в исследовании [6] рассматривается вопрос о холодильной

системе, связанной с отходящим теплом установки каталитического крекинга. Предлагается новый процесс охлаждения с использованием собственного низкопотенциального тепла для одновременного повышения энергоэффективности и производительности установки, а также проведен анализ систем утилизации энергии, основанной на органическом цикле Ренкина (ORC) в сравнении с абсорбционным охлаждением.

Авторы Бохонг Ван, Jiří Jaromír Klemes, Лимей Гай, Петар Сабев Варбанов, Юнту Лян в работе «Сжатие тепла и электроэнергии для интеграции процессов в гибридных энергетических системах» [7] использовали пинч-анализ в гибридных системах (системах комбинированного производства тепла и электроэнергии). В этой статье была расширена концепция пинч-анализа и предложен теплоэнергетический пинч-анализ для определения количества тепла, которое должно быть рекуперировано из гибридной энергетической системы. Композитная кривая тепла и электроэнергии (НРСС) разработана для визуализации общей потребности в энергии и разделенной тепле и электроэнергии (электричестве) гибридной энергетической системы в течение рабочего периода времени. Этот вклад позволил создать новый метод определения минимальных целевых значений мощности (электроэнергии) под названием «Анализ тепла и мощности» (НРРА) для комбинированных систем производства тепла и электроэнергии.

Еще одним актуальным направлением использования пинч-анализа является снижение углеродного следа, также весьма актуальным направлением нефтепереработки. В работе [8] авторами предпринята попытка разработки систематической основы планирование эмиссий CO₂ с промышленной площадки с использованием интегрированного набора инструментов, связанных с пинч-анализом, с алгебраическими алгоритмами, созданными для дополнения графического представления. Применение этой систематической схемы к наглядному примеру промышленного объекта привело к общему снижению теплоснабжения на 56,7 %, электроэнергии на 74,3 % и CO на 99,8 %.

В работе [9] на основе методов пинч-анализа была разработана интегрированная система для производства сжиженного природного газа и чистого водорода с использованием отходящих газов из различных отраслей промышленности. Для этой цели охлаждение, необходимое для очистки водорода и сжижения природного газа, обеспечивается с помощью смешанной системы охлаждения хладагента. Разработан органический цикл Ренкина на основе избыточного тепла системы в качестве поглотителя тепла и возобновляемой солнечной энергии в качестве источника тепла. Итоговые результаты, полученные в результате параметрического исследования,

представляют собой увеличение производительности основных продуктов (СПГ и чистого водорода) на 25,88 %. Кроме того, когда соотношение СПГ и топливного газа увеличивается на 48,08 %, соотношение основного продукта и побочного продукта увеличивается с 54 до 62 моль %.

Авторы Раджарши Бандьопадхьяй, Оле Фрей Алкилде, Шридеви Упадхьяюла в работе [10] делятся опытом применения пинч-анализа и анализа эксергии при проектировании нового технологического предприятия с целью повышения его энергоэффективности на примере установки гидроочистки дизельного топлива. Методы пинч-анализа используются для оценки минимальной потребности в энергии, выбора инженерных сетей и проектирования оптимальной сети теплообменников, в частности, проводилось сравнение схем холодной и горячей сепараций.

В работе Аделя Булуаша [11] рассматривается разработка технологического процесса и экономическая оценка интеграции органического Ренкина открытого цикла (ORC) во фракционную перегонку алканов. Интеграция оптимизирована в рамках технологии пинчирования и практически обеспечивается за счет использования смесей технологических жидкостей дистилляции легких, средних и высших алканов в качестве рабочих жидкостей в открытых циклах. По сравнению с н-пентановым ORC, результаты показывают, что OROC могут выдавать 3 МВт мощности при снижении удельных инвестиционных и эксплуатационных затрат на 23,27% соответственно.

В работе «Новый подход к модернизации процесса абсорбции-стабилизации для повышения энергоэффективности на нефтеперерабатывающих заводах» [12]. В этой работе представлен новый процесс абсорбции-стабилизации с двухступенчатой конденсационной секцией для дальнейшего повышения эффективности использования энергии. В новом процессе конденсатор, продуктовая емкость и боковой ребойлер интегрированы в исходный процесс, а затем выполняется схема интеграции тепла. По сравнению с существующим процессом предлагаемый процесс может сократить холодную и горячую полезность на 17,98% и 25,65% соответственно, а также снизить общие годовые эксплуатационные расходы сети теплообменников на 17,48%. Кроме того, модернизация процесса снижает годовые эксплуатационные расходы на охлаждающую воду и пар примерно на 346 617 долларов за счет капитальных затрат около 487 006 долларов, а соответствующий период окупаемости составляет примерно 17 месяцев. В качестве среды применения методов пинч-анализа использовалась среда моделирования Aspen Energy Analyzer v.7.2

Аналогичные методы применялись группой авторов (Маджид Мохсенпур, Мохаммад-Махди Пазуки, Мохсен Салими, Маджид Амидпур) применительно к сети теплообменников установки фталевого ангидрида в работе [13]. Чтобы улучшить рекуперацию энергии при минимизации количества агрегатов, авторами была разработана оптимизированная сеть теплообменников с использованием технологии сжатия. Вместо того, чтобы поглощать избыточное тепло через охлаждающую воду, оно было перенаправлено на выработку пара в парогенераторе-рекуператоре. Такой стратегический подход позволяет заводу избежать ежегодных затрат на охлаждение, оцениваемых примерно в 54 621 евро, при работе в течение 7 000 часов в год. По расчетам авторов, компания должна получить значительную годовую прибыль в размере около 477 295 евро. Для достижения цели также применялся метод пинч-анализа с использованием среды Aspen Energy Analyzer.

Помимо использования методов пинч-анализа применительно к сетям теплообменников, широко распространена практика энергетической интеграции энергоемкого оборудования для оптимизации использования энергии. Так, в работе [14] исследование использования метода движущей силы для определения наилучшей последовательности дистилляции для повышения энергоэффективности в процессе ректификации смеси алканов, состоящей из пяти компонентов: н-гексан, н-гептан, н-октан, н-нонан и н-декан. С помощью программного обеспечения ASPEN HYSYS V9 авторами было проведено тщательное моделирование 14 возможных последовательностей дистилляционных колонн, включая последовательность движущих сил. Затем данные были извлечены для пинч-анализа и определена наилучшая последовательность на основе общей нагрузки, тепловой нагрузки и нагрузки на охлаждение. Затем была предложена сетчатая схема для сети теплообменников для наилучшей конфигурации. Был определен лучший из вариантов, в котором удалось снизить на 33,87 % тепловую нагрузку и на 35,84 % нагрузку на систему охлаждения.

Наибольший экономический эффект применение методов пинч-анализа и рекуперации энергии приносит на крупных потребителях энергии. В условиях нефтеперерабатывающих заводов, как правило, наиболее крупным потребителем энергии является установка первичной переработки нефти, на которой происходит первичное разделение нефти на фракции. Группой авторов (Сабри Мрайед, Мохамед бин Шамс, Мухаммед аль-Хайят, Нассер аль-Нуайми) в работе «Применение пинч-анализа для повышения эффективности интеграции тепла в установке перегонки сырой нефти» [15] была проведена оценка тепловой эффективности сети теплообменников

существующей установки первичной переработки нефти. Авторами отмечается, что метод пинч-анализа может помочь свести к минимуму потери энергии за счет модернизации сети теплообменников и он доказал свою эффективность во многих аспектах применения. В ходе сравнения различных вариантов конфигурации, определено, что может быть восстановлено около 67,5 МВт максимальной мощности охлаждения и нагрева по сравнению с существующей нагрузкой на энергосистему в 148,6 МВт, что составляет снижение приблизительно на 45%. Аналогичный опыт представлен при анализе методом пинч-анализа сетей теплообменников подогрева сырой нефти на нефтеперерабатывающем заводе в Кувейте [16].

Аналогичный принцип использования пинч-анализа может быть применен при сокращении энергоресурсов. Группа авторов (Хасан Хашеми, Фаллах ха-Шеми, Стефани Янг, Фируз Рости) в работе [17] «Минимизация и оптимизация расхода воды на нефтеперерабатывающем заводе с помощью водного пинч-анализа: тематическое исследование в Иране». Результаты данного исследования показывают, что анализ воды может быть использован для минимизации потребления пресной воды за счет сокращения потребления пресной воды до 45% при подходе «Single Pollutant (химическое потребление кислорода или общие взвешенные примеси)» и на 56% при подходе Double Pollutant (химическое потребление кислорода и общие взвешенные примеси), а также привело к сокращению образующихся сточных вод на 31% и 52% на нефтеперерабатывающем заводе в Керманшахе. Этот метод может быть применен не только на нефтеперерабатывающих заводах, но и в других водоемких отраслях промышленности для оптимизации использования воды.

Аналогичный опыт был приведен на ряде российских нефтяных компаний. В ОАО «ТАИФ-НК проект по оптимизации энергозатрат на установке гидрокрекинга позволил снизить потребление пара на 15%.

По данным ПАО «ЛУКОЙЛ», внедрение пинч-анализа на нефтеперерабатывающем заводе в Перми привело к экономии топлива на 10 %. В ООО «КИНЕФ» проект по модернизации теплообменной сети на установке каталитического риформинга позволил снизить энергозатраты на 20%.

Эффекты от рассмотренных примеров применения пинч – анализа приведены в таблице 1:

Таблица 1 – Примеры внедрения пинч-анализа на нефтеперерабатывающих заводах

№	Предприятие	Объект	Экономия энергии	Снижение затрат
1	ОАО «ТАИФ-НК» (Россия)	Установка гидрокрекинга	15 % (пар)	-
2	ПАО «Лукойл» (Россия)	Технологические печи	10 % (топливо)	-
3	ООО «КИНЕФ» (Россия)	Установка каталитического риформинга	20% (энергозатраты)	-
4	Кувейтский НПЗ [16]	Установка первичной переработки нефти	45 % (тепло/охлаждение)	-
5	Иранский НПЗ [17]	Оборотное водоснабжение	45–56 % (вода)	Снижение стоков на 31–52 %
6	Иранский НПЗ	Установка фталевого ангидрида	-	477 295 Евро/год

Сравнение использованных в статье методов оптимизации энергопотребления приведено в таблице 2:

Таблица 2 – сравнение методов оптимизации энергопотребления

Метод	Преимущества	Недостатки	Применимость на НПЗ
Пинч-анализ	Высокая точность, снижение затрат на 15-45%, возможность масштабирования	Требуе т детальных данных для построения модели и проведения анализа	Широкая
Использование органических циклов ORC	У т и л и з а ц и я низкопотенциального тепла	Высокие капитальные затраты	Ограниченная
Абсорбционное охлаждение	Энергоэффективность	Сложность интеграции	Узкая

Выводы

Проведенный анализ демонстрирует, что пинч-анализ является высокоэффективным инструментом повышения энергоэффективности нефтеперерабатывающих заводов (НПЗ). Его применение позволяет достичь значительного сокращения энергопотребления (на 15–45 %) за счет оптимизации тепловых потоков, рекуперации тепла и минимизации потерь энергии. Наибольший эффект наблюдается на устаревших производствах, где изначально отсутствовала глубокая интеграция технологических процессов.

Ключевые преимущества пинч-анализа включают:

- Снижение эксплуатационных затрат за счет уменьшения потребления топлива, пара и охлаждающих агентов.
- Экологическую выгоду – сокращение выбросов CO₂ и других вредных веществ благодаря более рациональному использованию энергии.
- Гибкость применения – метод может быть адаптирован для различных процессов, включая первичную переработку нефти, каталитический крекинг и гидроочистку.
- Интеграцию возобновляемых источников энергии, таких как органические циклы Ренкина (ORC), использующие низкопотенциальное тепло.

Однако внедрение пинч-анализа сопряжено с рядом сложностей, включая необходимость точных исходных данных, высокие капитальные затраты на модернизацию и сопротивление изменениям на предприятиях с устоявшимися технологическими схемами. Для преодоления этих барьеров рекомендуется:

- Использовать современное программное обеспечение (Aspen Energy Analyzer, MATLAB) для моделирования и оптимизации процессов.
- Разрабатывать поэтапные планы модернизации с учетом экономической целесообразности.
- Проводить обучение персонала и внедрять культуру энергоэффективности на предприятиях.

В перспективе дальнейшее развитие пинч-методов должно быть направлено на их интеграцию с цифровыми технологиями (AI, IoT) и расширение применения в гибридных энергосистемах. Это позволит не только повысить энергоэффективность НПЗ, но и обеспечить их устойчивое развитие в условиях ужесточающихся экологических норм и роста конкуренции на рынке.

Таким образом, пинч-анализ остается одним из наиболее перспективных подходов к оптимизации энергопотребления в нефтепереработке, сочетающим экономическую выгоду, экологичность и технологическую эффективность.

В дополнение к экономическим выгодам, пинч-анализ способствует снижению выбросов парниковых газов и повышению технологической надежности. Рекомендуется активное внедрение методологии на существующих и проектируемых нефтеперерабатывающих предприятиях, а также развитие прикладных исследований в области интеграции органических циклов Ренкина и водоподготовки с применением пинч-методов.

Список использованных источников

- 1 Linnhoff, B., Hindmarsh, E. The Pinch Design Method for Heat Exchanger Networks // Chemical Engineering Science. – 1983. – № 5. – P. 745–763.
- 2 Klemeš, J. New directions in the implementation of Pinch Methodology (PM) // Renewable and Sustainable Energy Reviews. – 2018. – № 98. – P. 439–468.
- 3 Chengtian, C., Jinsheng, S. Coupling design of interunit heat integration in an industrial crude distillation plant using pinch analysis // Applied Thermal Engineering. – 2017. – № 117. – P. 145–154.
- 4 Olsen, D., Abdelouadoud, Y., Liem, P. The Role of Pinch Analysis for Industrial ORC Integration // Energy Procedia. – 2017. – № 129. – P. 74–81.
- 5 Dianliang, F., Guixiang, L., Huijuan, S., Yanhua, L., Lin L., Zhen D., Mingxin, L. An advanced comprehensive graphical tool with shifted stream temperatures to efficiently design cost-effective heat exchanger network // Energy. – 2018. – № 145. – P. 356–366.
- 6 Siyao, L., Chengtian, C., Jie, H., Jinsheng, S. Feasibility assessment of a novel refrigeration FCC gas plant driven by self waste heat // Energy. – 2018. – № 145. – P. 356–366.
- 7 Wang, B. Klemeš, J. Gai, L., Varbanov, S.P., Liang, Y. Heat and Power Pinch for Process Integration targeting in hybrid energy systems // Journal of Environmental Management. – 2021. – № 287. – P. 112–123.
- 8 Ezah, A., Sharifah A., Rafidah, W. An integrated Pinch Analysis framework for low CO2 emissions industrial site planning // Journal of Cleaner Production. – 2017. – № 146. – P. 125–138.
- 9 Ahmadnejad, A., Ebrahimi, A., Ghorban, B. Pinch and exergy assessment of an innovative hydrogen and methane purification process configuration based on solar renewable energy // Fuel. – 2024. – № 359. – P. 130–134.
- 10 Rajarshi, B., Ole F., Sreedevi, U. Applying pinch and exergy analysis for energy efficient design of diesel hydrotreating unit // Journal of Cleaner Production. – 2019. – № 232. – P. 337–349.
- 11 Boualouache, A. Integration of organic Rankine open cycles to alkanes fractional distillation: Process design and techno-economic assessment // Chemical Engineering and Processing. Process Intensification. – 2023. – № 189. – 109 p.
- 12 Liu, X. G., He, J. J., Chen, B. J., Zhang, Q. L. A new retrofit approach to the absorption-stabilization process for improving energy efficiency in refineries // Energy. – 2017. – № 118. – P. 1131–1145.
- 13 Mohsenpour, M., Pazuki, M.M., Salimi, M., Amidpour, M. Optimized heat exchanger network design for a phthalic anhydride plant using pinch technol-

ogy: A Maximum Energy Recovery approach with economic analysis // Results in Engineering. – 2024. – № 24. – 103438.

14 Shahrudin, M. Z., Rahimi, A. N., Zubir, M. A., Fakhrol, M. Energy Integrated Distillation Column Sequence by Driving Force Method and Pinch Analysis for Five Components Distillation // Energy Procedia. – 2017. – № 142. – P. 4085–4091.

15 Mrayed, S., Bin Shams, M., Al-Khayyat, M., Alnoaimi, N. Application of pinch analysis to improve the heat integration efficiency in a crude distillation units // Cleaner Engineering and Technology. – 2021. – 100168.

16 Alhajri I. H., Gadalla M. A., Abdelaziz, O. Y., Ashour F. H. Retrofit of heat exchanger networks by graphical Pinch Analysis – A case study of a crude oil refinery in Kuwait // Case Studies in Thermal Engineering. – 2021. – № 26. – 101030.

17 Hashemi, H., Hashemi, F., Young, S., Rosti, F. Minimization and optimization of water consumption in an oil refinery using water pinch analysis: A case study in Iran // Water Resources and Industry. – 2024. – № 31. – 100254.

Поступило в редакцию 06.05.25.

Поступило с исправлениями 28.01.26.

Принято в печать 27.02.26.

*Я. Сергеев¹, Г. Ж. Сейтенова², Р. М. Дюсова³

^{1,3}Торайғыров университеті,

Қазақстан Республикасы, Павлодар қ.

²Л. Н. Гумилев атындағы Еуразия ұлттық университеті,

Қазақстан Республикасы, Астана қ.

06.05.25 ж. баспаға түсті.

28.01.26 ж. түзетулерімен түсті.

27.02.26 ж. басып шығаруға қабылданды.

МҰНАЙ ӨҢДЕУ ЗАТТАРЫНЫҢ ЭНЕРГЕТИКАЛЫҚ ТИІМДІЛІГІН АРТТЫРУ ӘДІСІ РЕТІНДЕ ПИНЧ-ТАЛДАУДЫ ҚОЛДАНУ

Мақала мұнай өңдеу зауыттарының энергия тиімділігін арттыру үшін шымыу талдау әдістемесін қолдануды зерттеуге арналған. Энергия бағасының өсуі және қатаң экологиялық талаптар жағдайында шымыу талдау операциялық шығындарды азайтуға және кәсіпорындардың көміртегі ізін азайтуға мүмкіндік беретін энергия тұтынуды оңтайландырудың қуатты құралы болып

табылады. Әдістеме процестердің жылулық интеграциясына негізделген, бұл әсіресе ең ірі энергия тұтынушыларының қатарына жататын мұнай өңдеу зауыттары үшін маңызды. Мақалада әртүрлі технологиялық қондырғыларда шымыу талдауының тиімділігін көрсететін заманауи ғылыми басылымдарға шолу берілген. Әдістің негізгі артықшылықтары қарастырылады, оның ішінде энергия тұтынуды 15-45%-ға төмендету, отын шығынын азайту және парниктік газдар шығарындыларын азайту. Посткеңестік кеңістікте шымыу талдауды жүзеге асырудағы кедергілерге ерекше назар аударылады, мұнда көптеген кәсіпорындар энергия тиімділігінің заманауи талаптарын есепке алмастан жобаланған. Жылу алмасу желілерін жаңғырту, органикалық Ранкин циклдерін (ORC) біріктіру және суды тұтынуды оңтайландыру сияқты ресейлік және шетелдік мұнай өңдеу зауыттарында шымыу талдауын сәтті қолдану мысалдары келтірілген. Ең үлкен экономикалық тиімділікке термиялық интеграция 67,5 МВт-қа дейін энергияны алуға мүмкіндік беретін мұнайды бастанқы өңдеу және каталитикалық крекинг қондырғыларында қол жеткізілетіні атап өтілді.

Мақалада CO₂ шығарындыларын азайту және жаңартылатын энергия көздерін енгізуді қоса алғанда, тұрақты даму контекстінде шымыу талдаудың әлеуеті ашылады. Әдістемені одан әрі дамыту үшін Aspen Energy Analyzer сияқты заманауи бағдарламалық құралдарды белсенді пайдалану және гибриді энергетикалық жүйелер саласында қолданбалы зерттеулер жүргізу ұсынылады.

Кілтті сөздер: шымыу талдауы, энергия тиімділігі, мұнай өңдеу зауыттары, технологиялық термиялық интеграция.

*Ya. Sergeevs¹, G. Zh. Seitenova², R. M. Duysova³

^{1,3}Toraighyrov University,
Republic of Kazakhstan, Pavlodar;

²L. N. Gumilyov Eurasian National University,
Republic of Kazakhstan, Astana.

Received 06.05.25.

Received in revised form 28.01.26.

Accepted for publication 27.02.26.

APPLICATION OF PINCH ANALYSIS AS A METHOD FOR INCREASING ENERGY EFFICIENCY OF OIL REFINERIES

The article is devoted to the study of the application of the pinch analysis methodology to improve the energy efficiency of oil refineries. In the context of rising energy prices and stricter environmental requirements, pinch analysis is a powerful tool for optimizing energy consumption, allowing to reduce operating costs and reduce the carbon footprint of enterprises. The methodology is based on thermal integration of processes, which is especially important for oil refineries, which are among the largest energy consumers. The article provides a review of modern scientific publications demonstrating the effectiveness of pinch analysis at various process facilities. The key advantages of the method are considered, including a decrease in energy consumption by 15–45 %, a reduction in fuel costs and a decrease in greenhouse gas emissions. Particular attention is paid to the barriers to the implementation of pinch analysis in the post-Soviet space, where many enterprises were designed without taking into account modern energy efficiency requirements. Examples of successful application of pinch analysis at Russian and foreign oil refineries are given, such as the modernization of heat exchange networks, the integration of organic Rankine cycles (ORC) and the optimization of water consumption. It is noted that the greatest economic effect is achieved at primary oil refining and catalytic cracking units, where thermal integration allows for the recovery of up to 67.5 MW of energy.

The article reveals the potential of pinch analysis in the context of sustainable development, including the reduction of CO₂ emissions and the introduction of renewable energy sources. For further development of the method, it is recommended to actively use modern software tools, such as Aspen Energy Analyzer, and conduct applied research in the field of hybrid energy systems.

Keywords: pinch analysis, energy efficiency, oil refineries, thermal integration, heat recovery.

***Д. Т. Сулейменова¹, Ж. К. Оржанова²,
Т. В. Мещерякова³, А. А. Боканова⁴**

¹Ғұмарбек Дәукеев атындағы АЭЖБУ,

Қазақстан Республикасы, Алматы қ.

²«Алатау Жарық Компаниясы» АҚ,

Қазақстан Республикасы, Алматы қ.

³Сәтбаев университеті,

Қазақстан Республикасы, Алматы қ.

⁴Евразия технологиялық университеті,

Қазақстан Республикасы, Алматы қ.

¹ORCID: <https://orcid.org/0009-0005-1996-8235>

²ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-5680-6674>

³ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-1910-8487>

⁴ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-3462-5629>

*e-mail: duriyasuleimenova@mail.ru

ТАРАТУШЫ ЭЛЕКТР ЖЕЛІЛЕРІНДЕГІ ЭЛЕКТР ЭНЕРГИЯСЫНЫҢ ШЫҒЫНДАРЫН ЕСЕПТЕУДЕ ЫҚТИМАЛДЫҚ-СТАТИСТИКАЛЫҚ ӘДІСТЕРІНІҢ ҚОЛДАНЫЛУЫН ТАЛДАУ

Қазақстанның энергетика секторын реформалау, электр энергиясы (ЭЭ) мен қуаттың бәсекеге қабілетті нарығын құру, реактивті қуат тұтыну мен балансын оңтайландыру шарттары контекстіндегі жаңа нормативтік құжаттарды енгізу, энергетикалық сектордың тиімділігінің өзектілігін ерекше арттырып, инвестициялау деңгейі мен тұтынушыларға минималды тарифтерді қамтамасыз етуге мүмкіндік туғызды.

Жалпы энергетикалық жүйелердің немесе жекеленген желілік компаниялардың тиімділігінің маңызды көрсеткіші - электр энергиясының шығындары. Бұл жұмыс режимінің көрсеткішінің нақты және сенімді анықталуы, электр желілерін басқаруда және пайдаланудың кешенді міндеттерін шешуде басты маңызға ие. Таратушы электр желілеріндегі электр энергиясының техникалық және коммерциялық шығындарын азайтуға арналған приоритетті

шараларын таңдау – шығындар құрылымының тәптіштеп есептелуі мен нақты және рұқсат етілген теңгерімсіздіктерінде негізделеді. Сонымен қатар электр режимдерінің (көп режимділік) басқару жүйелері және электр тұтыну басқару арқылы жасалған маусымдық жүктемелер туралы ақпаратқа ие болу қажет. Мақалада 2022-2024 жж. маусымдық жүктемелер графигі мен активті қуат P және ток бойынша тәуліктік электр жүктемелері келтірілген. Реактивті қуат Q , электр энергиясындағы шығындар, кернеулердің өлшеу диапазондары, қуат ағындары, электр энергиясының белгілі бір мерзімдегі өндірісі, электр энергиясының өзіндік құны және т.б. одан әрі өңдеу графиктері түрінде көрсетіліп және саралаудан өткізілген (типтік графиктер, компоненттер, математикалық модельдер). Есептеу талдауының күрделілігіне байланысты практикалық іске асыру үшін ол интеграцияланған түрде көрсетілуі қажет.

Мақала, электр тораптарындағы жүктеме деректері негізінде, ықтималдық теория мен математикалық статистикаға негізделген электр энергиясының шығындарын ықтималдық-статистикалық әдістерін қолдана отырып есептеу – өзекті мәселенің шешіміне арналған. Интегралды сипаттамаларды көп режимдікті ескере отырып электр жүктемелерінің модельдеуі негізінде анықтау - режимдерді есептеу еңбек сыйымдылығын азайтуға, реактивті қуат ағындарын оңтайландыру міндеттерін шешу кезінде сенімді нәтижелер алуға және электр тарату желілеріндегі (ЭТЖ) кернеу деңгейлерін нормаланған мәндерге сәйкес келтіруге мүмкіндік берді.

Кілтті сөздер: тарату желілері, электр энергиясының шығындары, электр жүктемелері, көп режимдік, ықтималдық-статистикалық әдіс, факторлық талдау, жүктемелер графиктері, кернеу деңгейлері.

Кіріспе

Қазақстан электр энергетика саласының мемлекеттік реттеуден нарықтық жүйеге көшуі 1997 жылдары басталды, бұл желілік жұмыстардың табыстылығына көп қиырлы әсер етті. Электр энергиясы нарығындағы заманауи шарттарының оңтайлы жоспарлау мен энергетикалық секторды басқаруда өндіріс тиімділігі мен инвестициялық деңгейлерді арттыруға және тарифтерді төмендетуге бағытталған, жаңа міндеттер мен мәселелер пайда болды.

Электр энергиясының шығындарын нақты есепке алу энергетикалық жүйенің жұмыс тиімділігінің мақсатты көрсеткіштерінің бірі болып

табылады. Электр энергиясының шығындарының талдауы, дұрыс және сенімді есептелуі, әртүрлі деңгейдегі электр тораптары ұйымдарының рұқсат етілген және нақты теңгерімсіздіктерін есептеу, шығындардың нормативті мәндерін талдау, электр энергиясының өңірлік тарифтерін негіздеу және белгілеу үшін қажет [1; 2].

Энерго үнемдеудің басты міндіті электро энергия шығындарын төмендету. Электро энергия шығындарын төмендету шараларын әзірлеу және ЭТА жұмыс режимдерін талдау үшін, электр тораптарының барлық мүмкін жұмыс режимдерінің (көп режимділік) негізгі параметрлерінің жоғары дәлдік пен берілген сенімділікпен электро энергия шығындарын есептеу түрлі әдістерін дамыту және жетілдіру [3].

Қазақстан тарату желілері елеулі шығындармен 18,6% сипатталады және энергияның түрлі тарату көлемімен, тарату желілерінің кернеу класстарымен, желілердің ұзындығымен, қасалқы станса санымен, электр тораптары топологиясымен ерекшеленеді [4].

ЭТА шығындарына: электр тораптары конфигурациясы мен техникалық параметрлері, олардың жүктемелері мен жұмыс режимдері, электро энергиясының сапасы, жабдықтар жұмыс сенімділігі, жүйеаралық және желіаралық қуат пен электроэнергия ағымдары, ауа-райы жағдайы, тәулік уақыты мен жыл мезгілі, электр энергиясын жіберу, пайдалы жіберу және т.б. есептеу мен деректер жинау жүйелерінің жағдайы әсер етеді [2].

Ықтимал-статистикалық әдістерді қолдану, электр жүктемелер туралы бастапқы ақпаратты барынша жинақтауға, электр энергия шығындарының нормативтерін белгілеу бойынша міндеттерді шешуге, коммерциялық шығындардың ошақтарын табуға, ЭТА басқару экономикалық тиімділігін арттыруға және электро энергия тарифтерін негіздеуге ықпал етеді.

Материалдар мен әдістері

Электр энергия шығындарын есептеу әдісін таңдау, энерго жүйенің жұмыс режимдері, жүктемелері және ерекшеліктері бойынша бар бастапқы ақпаратпен анықталады.

Тарату желілері ашық (радиалды, магистралды, тармақты магистралды) және тұйық (шеңберлі, екі жақты қоректі, күрделі-тұйық) схемалары бойынша жүзеге асырылады және пайдаланылады.

Тұйық желілерді есептеу, режимдерін талдау, автоматикасы мен қорғауы, жұмыс режимі мен басқаруы ашық желілерге қарағанда әлдеқарай күрделі. Тұйық желілер қатты тұтынушылардың жұмыс режимдерінен және аздап басқа желілердің жүктемелерінен тәуелді. 110 кВ таратушы электр тораптарының негізге бөлігі және 35 кВ электр желілерінің барлығы ашық

схема бойынша жұмыс жасайды, тек қала электр тораптары ғана жабық түрінде орындалып ашық түрінде пайдаланып ерекшелік құрайды.

Электр энергия шығындарын есептеуде негізгі қиындық ақпараттың әртүрлі ақпаратты үлкен көлемде енгізу және өңдеумен байланысты. Тұрақты режимде шығындарды есептеу дәстүрлі түрде желінің схемалық және режимдік параметрлеріне негізделген.

Тарату желілерінің көпрежимдік және схемарежимдік жұмыс параметрлері байынша мәліметтер қосалқы станса, қуат трансформаторлары, кабельдік және ауа желілері, тұтынушылар мен жұмыс режимдері, эксперименттік немесе жабдықтардың нормативтік-анықтамалық мәні бар нормативті-анықтамалық ақпараттар туралы сапалы ақпараттық деректермен қамтамасыз етуде негізделген.

Қолданылатын математикалық аппаратқа байланысты модельдеу тапсырмаларын шешу кезінде келесі әдістер қолданылады:

- статистикалық (ықтималдық);
- детерминалдық (алгебралық);
- біріктірілген статистикалық-детерминалдық.

Электр желілерінің жүктемелерінің өзгеруі көптеген кездейсоқ оқиғалардың жүзеге асуына әкеледі. Аналитикалық функция мен кездейсоқ шаманың эксперименттік тәуелділігі арқылы электрлік жүктемелерді (ЭЖ) ықтималды сипаттау мүмкін.

ЭЖ ықтималдық қасиеттері оның өзгеру табиғатын көрсететін, математикалық статистика мен ықтималдық теорияның негізгі ережелерін қолдану арқылы сипатталады. Электр жүктемелерін ықтималдық әдістер негізінде модельдеу [5;6] жұмыстарында көрсетілген.

Статикалық модельдер электр тұтыну (ЭЭ шығындарын анықтағанда) процесстерін болжау, модельдеу кезінде қолданылады және еңбек шығынын қысқартатын, интервалдық режим есептеулерін өткізуді қажет етпейтін, өзгермейтін Якоби матрицасы бар, үш-төрт сызықтық теңдеулер жүйесін анықтау мен электр энергиясын тарату жүйесінің тұрақтанған режимінің орта жүктемелерін есептеу болып табылады.

Математикалық модельдердің сипаттамалық үлгілерін алу мүмкіндігі болмаған жағдайда детерминалдық тәсіл қолданылады [7; 8; 9]. ЭЖ өзгеру сипаты тәуліктік (апталық, маусымдық) заңдылықпен, ЭЭ тұтыну режимінің циклдылығымен, жүктемелердің күнтізбеге тәуелді табиғи өсуі немесе өзгеруімен көренеді.

6–10 кВ-тық ашық схема бойынша жасалған таратушы электр тораптарының ақпараттық қамтамасыз етілуі, бас бөліктерінің параметрларымен (энергия өткізілуі, ток жүктемелерінің максималды

және минималды мәні, қосалқы стансаларының тұтынған ЭЭ) көрсетілген, ал 35–150 кВ ашық және тұйық схемаларда – орта жүктемелер, берілген орталандырғыш аралығымен автоматтандырылған ақпараттық-өлшегіш жүйесімен электр энергиясын коммерциялық тіркеу (ААӨЖ ЭКТ) арқылы тіркелген жүктемелер графигімен немесе маусымдық жүктемелер деректерімен.

ЭЭ шығындарын ықтималдық-статистикалық әдісімен есептеу электр тораптарындағы есептеу кезеңіндегі орташа қуат шығындарын есептеуде негізделген. Бұл ретте тұрақталаған кезеңдегі теңдік (ТКТ) жүйесі есептеледі. Сонымен қатар үлгі тұрақты (тәуліктік циклдық, апталық және жылдық) және тұрақсыз (сыртқы факторлардың ықпалында) сипаттағы қуаттарды – кездейсоқ өзгертуге мүмкіндік береді. Қуаттың таралу заңдылықтары есептеу кезеңінің реттелген нұсқаларының деректерін көрсетеді, ал сандық сипаттамалар жалғыз іске асыратын– есептеу аралығындағы жүктеме графигін уақыттың орташаландыруымен белгіленеді. Бір кездейсоқ шамалар жүйесін, түйіндердегі қуаттарды басқа - желілердегі түйіндер кернеуі жүйесіне айналдыру қажет, солар арқылы қуат шығындарының математикалық болжамын есептеу қажет. Шын мәнінде желі түйіндеріндегі қуат пен кернеу таралу заңдылықтарының түрін білу тапсырманың мұндай тұжырымдауында артық, олардың тек сандық сипаты – математикалық күтілімдер мен ковариациялық сәттер ғана маңызды, яғни, негізінен жеке - сандық сипаттамаларды кездейсоқ шаманың жүйесіне айналдыру мәселесі ғана қарастырылады.

Нәтижелер және талқылау

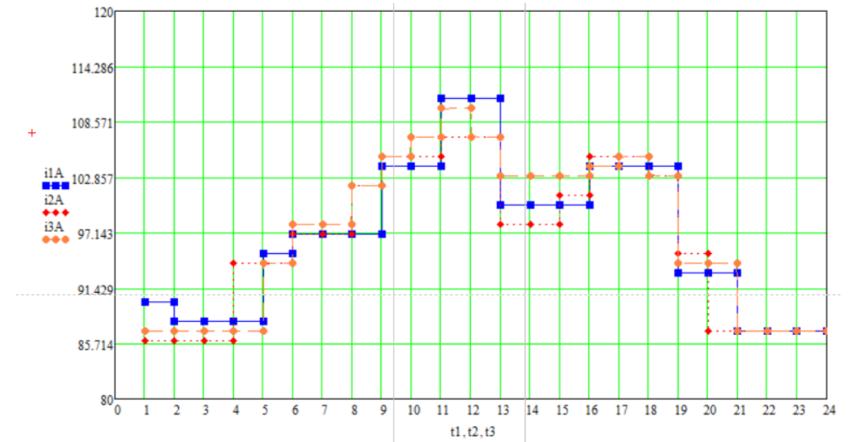
ЭЖ ықтималдық-статистикалық моделін қалыптастыру үшін бастапқы деректер ретінде жүктемелердің математикалық күтімдері (орташа мәндерін) және олардың есептік уақыт аралығындағы графигі (тәуліктік және айлық) қабылданады. Тәуліктік жүктеме графиктерінде, қыстық және жаздық тұрақтылық аралығының маусымдық минимумының өлшемдері туралы деректер бар (1 кесте).

1-кесте – 2023–2025 жылдарының 10/35/110кВ аудандық қосалқы стансасындағы жүктемелер өлшемі нәтижеі

Тәулік сағаты, сағат			Жүктеме, А			
2023 жыл			2025 год			
2024 жыл						
Кернеу 10 кВ			Маусым	Желтоқсан	Маусым	Желтоқсан
2	3	2	1,0	50	28/45	1,0
7	10	7	4,0	48	17/67	4,0

12	18	12	6,2	50	24/51	6,2
21	20	21	21	52	23/51	4,8
Кернеу 35 кВ			Маусым	Желтоқсан	Маусым	Желтоқсан
2	3	2	24	24	24	24
7	10	7	28	28	28	28
12	18	12	30	30	30	30
21	20	21	30	30	30	30
Кернеу 110 кВ			Маусым	Желтоқсан	Маусым	Желтоқсан
2	3	2	70,2	70,2	70,2	70,2
7	10	7	81,4	81,4	81,4	81,4
12	18	12	72,7	72,7	72,7	72,7
21	20	21	106,5	106,5	106,5	106,5

Қапшағай ЭТА-ның 2 қосалқы стансасындағы жүктеменің 2024 жылдың желтоқсан айындағы өзгеру динамикасы 1-ші суретте көрсетілген.



1-сурет – 2024 жылдың Қапшағай ЭТА жүктемелер графигі

110–220 кВ желілеріндегі жүктемелердің айлық графигін, тіркеу жиілігін 10 секундтан тәулікке дейін өзгерту мүмкіндігі бар, ААӨЖ ЭКТ арқылы алады. Сонымен қатар қарастырылып отырған аралық үшін ЭЖ моделін құрғанда, сәйкес келетін аралықта түйіннің тұтынған энергиясы туралы деректер қолданылуы мүмкін.

Электр энергия шығындары анықталады:

$$W = M[P]T_p, \quad (1)$$

бұл жерде $M(P)$ – қуат шығындарының математикалық күтімі немесе электр желісіндегі орташа қуат шығындары ΔP_{cp} ; T_p – уақыттың есеп кезеңі [5; 10].

ЭЭ шығындарын анықтағандағы басты қиындық, электр жүктемелердің (ЭЖ) өзгеруіне тәуелді интегралды сипаттаманың (көпрежимділік) толық тіркелуі және олардың есептеу уақыт аралығының (тәулік, ай, тоқсан) T графигі болады.

Желінің барлық m көлденең элементтерінен және n+1 түйіндерінен тұратын схемасы үшін, ЭЭ жүктемелік шығындары ΔP қуат шығындарының барлық d аралығындағы Δt стационарлық (орталандыру) қосындысымен T есептеу кезеңінің жүктемелер графигімен есептеліп, анықталады

$$\Delta W_{\Sigma}^H = 3 \sum_{j=1}^m R_j \int_0^T I_j^2(t) dt = \sum_{j=1}^m \int_0^T \Delta P_j(t) dt = \sum_{i,j}^{n+1} \quad (2)$$

мұндағы $d=T/\Delta t$ – электр жүктемелер графиктерінің тұрақтылық аралығының саны; ΔP_{ij} – электр желісінің берілген тұрақтылық аралығындағы S, i-j арақашығындағы қуат шығындары [8;9]. Тәуліктік жүктемелер графигі 2-ші кестеде көрсетілген.

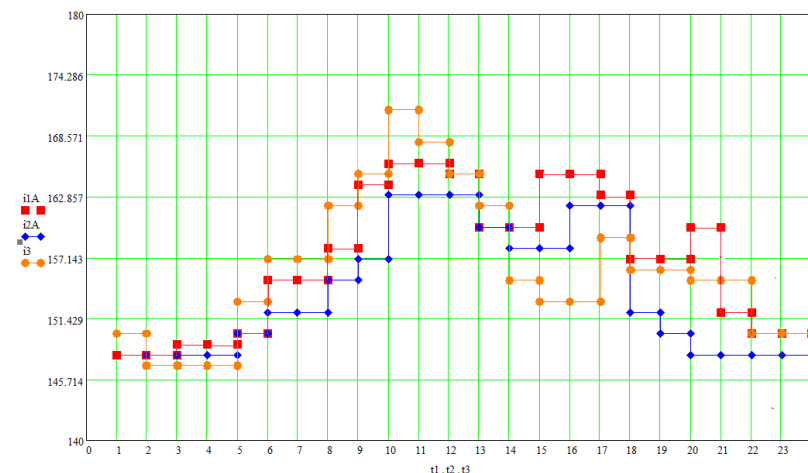
2-кесте – 2022–2024 жылдарының желтоқсан айының тәуліктік жүктемелер графигі

Тәулік сағаты, сағат	Жүктеме, А		
	2022 жыл	2023 жыл	2024 жыл
1	90 Син	87 Ф	86 К
2	89	87	86
3	89	87	86
4	89	87	86
5	89	87	94
6	94	95	94
7	98	98	99
8	97	97	99
9	97	101	101
10	104	105	105
11	104	107	105
12	110	110	107

13	110	107	107
14	100	97	97
15	100	103	97
16	100	103	102
17	104	101	105
18	104	101	105
19	93	94	95
20	93	94	87
21	87	87	87
22	87	87	87
23	87	87	87
24	83	83	87

Ұсынылып отырған тәсілдің перспективалығы аз еңбек сыйымдылығымен көрінеді, себебі негізінде ЭЭ шығындары лездік режимдердің аралық мәндерін өткізбей есептелетін.

2-ші суретте модельдеу болашағы көрсетілген.



2-сурет – Модельдеу болашағы

Ықтималдық-статистикалық әдіс электр жүктемелерінің факторлық моделінде және талдаудың модификацияланған стохастикалық моделіне негізделіп, анықталады:

$$\Delta W_{\text{с.с.}} \approx \left[\Delta P(MU, M\delta) + \left(\frac{1}{2} \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n k(U_i U_j) \frac{\partial^2 \Delta P}{\partial U_i \partial U_j} + \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n k(U_i \delta_j) \frac{\partial^2}{\partial U_i \partial \delta_j} + \frac{1}{2} \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n k(\delta_i \delta_j) \frac{\partial^2 \Delta P}{\partial \delta_i \partial \delta_j} \right) \right] \cdot T \quad (3)$$

$$= [\Delta P(MU, M\delta) + \delta(\Delta P)] \cdot T = M\Delta W + \sigma\Delta W,$$

мұндағы $\Delta P(MU, M\delta), k(\delta_i \delta_j), k(U_i U_j)$ – қуат шығындарының басты құрамаласы, модуль мен кернеу фазасының $MU, M\delta$, электр жүктемелерінің математикалық күтулерінің нүктесіне сәйкес, есептеу жолымен алынған корреляция сәті;

$\frac{\partial^2 \Delta P}{\partial U_i \partial U_j}, \frac{\partial^2}{\partial U_i \partial \delta_j}, \frac{\partial^2 \Delta P}{\partial \delta_i \partial \delta_j}$ – қуат шығындарының сәйкес параметрлерінің, сол нүктеге сай есептелген, екінші туынды өрнектері; $\delta(\Delta P)$ – активті қуат шығындарының дисперсиялық құрамдасы [9; 11; 12; 13; 14].

Кернеудің $MV, M\delta$ параметрлеріне қатысты есептелген, модуль мен фазасының, $k(V_i V_j), k(V_i \delta_j), k(\delta_i \delta_j)$ корреляциялық сәттері, $K = 2-3$ сызықтық теңдіктер жүйесінің шешімінен алынатын қосымша коэффициенттер арқылы, түйіндер кернеуінің линеарланған теңдіктердің жүйесіне ұқсас табылады [15; 16].:

$$U \begin{bmatrix} \gamma_k^* \\ \gamma_k^{**} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \vartheta_k^* \\ \vartheta_k^{**} \end{bmatrix}, k = 1, K. \quad (4)$$

Түйіндердің активті және реактивті қуаттарының сәйкес келетін математикалық күтімдерден ауытқуын ескеретін линеарланған теңдіктер жүйесінің оң бөлігінің векторлар құрамын $\vartheta_k^*, \vartheta_k^{**}$, орталықтандырылған $\Delta P_{ij}, \Delta Q_{ij}$ шамалардың түйіндерге сәйкес жүктемелер мен жүктеменің факторлық моделінің $\vartheta_{ki}^* = \frac{1}{d} \sum_{j=1}^d G_{kj} \cdot \Delta P_{ij}, \vartheta_{ki}^{**} = \frac{1}{d} \sum_{j=1}^d G_{kj} \cdot \Delta Q_{ij}, i = 1, n$ құрамаласы арқылы табады.

Қорытынды

Электр жүктемелерінің тәуліктік және маусымдық графиктерін, сонымен қатар жүктемені ықтималдық-статистикалық моделдеу негізіндегі

электр энергиясының шығындарын есептеу алгоритмы мен әдістемесін қолдану, реактивті қуат ағындарын оңтайландыру міндетін шешуге және таратушы электр желілерінде кернеу деңгейлерін, тәуліктік және маусымдық уақыт аралықтары үшін, практикалық мақсаттарға жеткілікті дәлдікпен нормалық мәндерге келтіруге мүмкіндік берді.

Пайдаланылған деректер тізімі

1 Воротницкий, В. Э., Кутовой, Г. П., Овсейчук, В. А. Снижение потерь электроэнергии. Стратегический путь повышения энергетической эффективности сетей//Новости электротехники. – 2015. – № 4(94). – 22 с.

2 Воротницкий, В. Э., Калинкина, М. А., Садовская, А. С., Новикова, М. А., Цой, Д. А. Об опыте расчетов, анализа и нормирования потерь электроэнергии в электрических сетях России и Казахстана// Электрические станции. – Энергопрогресс. – 2019. – №11. – 31–43 с.

3 Воротницкий, В. Э., Пузырев, В. Е. Программная реализация детерминированной и статистической методики расчета потерь электроэнергии и учета множества режимов электрической сети// Электротехнические и информационные комплексы и системы. – 2019. – № 4. – Т. 15. – 68–73 с.

4 <https://www.kazenergy.com>electric>project2035>. Концепция развития электроэнергетической отрасли.

5 Жилина, Н. А. Расчет нагрузочных потерь электрической энергии вероятностно-статистическим методом// Научный вестник НГТУ. – 2014. – № 2. – С. 176–182.

6 Герасименко, А. А., Нештаев, В. Б., Шульгин, И. В. Расчет потерь электроэнергии в распределительных электрических сетях на основе вероятностно-статистического моделирования электрических нагрузок// Изв.вузов. Электромеханика. – 2011. – (1). – С. 71–77.

7 Белоусов, А. В., Быстров, А. Б., Кошлич, Ю. А. Перспективы применения современных статистических и детерминированных методов прогнозирования в системах мониторинга энергопотребления//Вестник БГТУ им. В. Г. Шухова. – 2012. – № 4. – С.192–196.

8 Xin Kaiyuan, Yang Yuhua, Chen Fu. An advanced algorithm based on combination of GA with BP to energy loss of distribution system [J]. Proceedings of the CSEE, 2002. – 22 (2). – С. 79–82.

9 Герасименко, А. А., Шульгин, И. В. Стохастический метод расчета нагрузочных потерь электроэнергии в распределительных электрических сетях// Электрические станции. – 2013. – (4). – С. 44–59.

10 **Кучумов, Л. А., Кузнецов, А. А.** Энергосберегающее регулирование напряжения в узлах нагрузки. – Энергия единой сети: серия Энергосбережение. – 2018. – № 5(113)–6(114). – С. 56–60.

11 **Александрова, Т. А.** Использование методов искусственного интеллекта в процессах цифровизации ВУЗов и обеспечении качества образования – ТГУ, 25. – Материалы XIX МНПК. – С. 59–64.

12 **Жежер, Н. И.** Проектирование цифровых систем контроля и управления герметичности изделий: учебное пособие / Н.И. Жежер. – Оренбург: ИПК ГОУ ОГУ, 2009. – 438 с. – ISBN 978-5-7410-0858-4.

13 Holger Schau Analysis and Prediction of Power and Energy Losses in Distribution Networks / Holger Schau, Alexander Novitskiy // IEEE Universities Power Engineering Conference (UPEC). 2008. 43rd International 1–4 Sept. IEEE CNF, 2008. – P. 1–5.

14 **Mikic, O. M.** Variance-Based Energy Loss Computation in Low Voltage Distribution Networks // IEEE Transactions on Power Systems. – Vol. 22. – 2007. – № 1. – P. 179–187.

15 **Жұмажанов, С.К., Әкімжанов, Т. Б., Исабеков, Ж. Б., Әмір, Е. К.** Электр желісінде тарату кезінде электр энергиясының қосымша шығындары. – Павлодар: Торайғыров университетінің хабаршысы. Энергетикалық Серия. – 2023. – № 4. – Б. 23-35. – <https://doi.org/10/48081/RNHH2479>.

16 **Жежер, Н. И.** Математическое описание устройств и процессов как объектов систем автоматического управления: монография / Н.И. Жежер. – М.: Креативная экономика, 2012. – 200 с. – ISBN 978-5-91292-082-0.

References

1 **Vorotnickij, V. E., Kutovoj, G. P., Ovsejchuk, V. A.** Snizhenie poter elektroenergii. Strategicheskij put povysheniya energeticheskoy effektivnosti setej [Reduction of electricity losses. A strategic way to increase the energy efficiency of networks] // Novosti elektrotehniki. – 2015. – № 4(94) – 22 p.

2 **Vorotnickij, V. E., Kalinkina, M. A., Sadovskaya, A. S., Novikova, M. A., Coj, D. A.** Ob opyte raschetov, analiza i normirovaniya poter elektroenergii v elektricheskikh setyah Rossii i Kazahstana [On the experience of calculating, analyzing and rationing electricity losses in the electric networks of Russia and Kazakhstan] // Elektricheskie stancii. – Energoprogress. – 2019. – № 11 – 31-43 p.

3 **Vorotnickij, V. E., Puzyrev, V. E.** Programmaya realizaciya determinirovannoj i statisticheskoy metodiki rascheta poter elektroenergii i ucheta mnozhestva rezhimov elektricheskoy seti [Software implementation of a deterministic and statistical methodology for calculating electricity losses and accounting for

multiple modes of the electrical network] // Elektrotehnicheskie i informacionnye komplekсы i sistemy. – 2019. – № 4. – Vol. 15, – P. 68–73 p.

4 <https://www.kazenergy.com>electric>project2035>. [Koncepciya razvitiya elektroenergeticheskoy otrasli](#) [The concept of development of the electric power industry].

5 **Zhilina, N. A.** Raschet nagruzочnyh poter elektricheskoy energii veroyatno-statisticheskim metodom [Calculation of load losses of electrical energy by the probable statistical method] // Nauchnyj vestnik NGTU. 2014, №2. – P.176–182.

6 **Gerasimenko, A. A., Neshtaev, V. B., Shulgin, I. V.** Raschet poter elektroenergii v raspredelitelnykh elektricheskikh setyah na osnove veroyatnostno-statisticheskogo modelirovaniya elektricheskikh nagruzok [Calculation of electricity losses in electric distribution networks based on probabilistic and statistical modeling of electrical loads] // Izv.vuzov. Elektromekhanika, 2011, (1), 71–77.

7 **Belousov, A. V., Bystrov, A. B., Koshlich, Yu. A.** Perspektivy primeneniya sovremennykh statisticheskikh i determinirovannykh metodov prognozirovaniya v sistemah monitoringa energopotrebleniya [Prospects for the application of modern statistical and deterministic forecasting methods in energy consumption monitoring systems] // Bulletin of Belgorod state technological university named after V. G. Shukhov. 2012, №4. – P.192–196.

8 **Xin Kaiyuan, Yang Yuhua, Chen Fu.** An advanced algorithm based on combination of GA with BP to energy loss of distribution system [J]. Proceedings of the CSEE, 2002, 22 (2), 79-82.

9 **Gerasimenko, A. A., Shulgin, I. V.** Stokhasticheskij metod rascheta nagruzочnyh poter elektroenergii v raspredelitelnykh elektricheskikh setyah [Stochastic method for calculating load losses of electric power in distribution electric networks] // Elektricheskie stancii, 2013, (4), 44–59.

10 **Kuchumov, L. A., Kuznecov, A. A.** Energoberegayushee regulirovanie napryazheniya v uzлах nagruzki [Energy-saving voltage regulation in load nodes] – Energiya edinoj seti: seriya Energoberezhenie. – 2018. – № 5(113)–6(114) – P. 56-60.

11 **Aleksandrova, T. A.** Ispolzovanie metodov iskusstvennogo intellekta v processah cifrovizacii VUZov i obespechenii kachestva obrazovaniya [The use of artificial intelligence methods in the processes of digitalization of universities and ensuring the quality of education] – TSU, 25. – materials of the XIX international scientific and practical conference. – P. 59–64.

12 **Zhezhera, N. I.** Proektirovanie cifrovyyh sistem kontrolya i upravleniya germetichnosti izdelij: uchebnoe posobie [Designing digital systems for monitoring and controlling the tightness of products: a textbook] / N.I. Zhezhera. – Orenburg: Institute of Advanced Training of the State Educational Institution of Higher

Professional Education “Orenburg State University”, 2009. – 438 P. – ISBN 978-5-7410-0858-4.

13 Holger Schau Analysis and Prediction of Power and Energy Losses in Distribution Networks / Holger Schau, Alexander Novitskiy // IEEE Universities Power Engineering Conference (UPEC). 2008. 43rd International 1–4 Sept. IEEE CNF, 2008. – P. 1–5.

14 Mikic, O. M. Variance-Based Energy Loss Computation in Low Voltage Distribution Networks // IEEE Transactions on Power Systems. – Vol. 22. – 2007. – №. 1. – P. 179–187.

15 Zhumazhanov, S. K., Akimzhanov, T. B., Isabekov, Zh. B., Amir, E. K. Elektr zhelisinde taratu kezinde elektr energiyasynyn kosymsha shygyndary [Additional electricity costs when distributing in the power grid] - Pavlodar: Bulletin of Toraigyrov University. Energetics series. – 2023. – № 4. – 23–35 BB. <https://doi.org/10/48081/RNHH2479>.

16 Zhezhera, N. I. Matematicheskoe opisaniye ustroystv i processov kak obektov sistem avtomaticheskogo upravleniya: monografiya [Mathematical description of devices and processes as objects of automatic control systems: monograph]/ N.I. Zhezhera. – Moscow: Creative economy, 2012. – 200 p. – ISBN 978-5-91292-082-0.

30.10.25 ж. баспаға түсті.

14.11.25 ж. түзетулерімен түсті.

27.02.26 ж. басып шығаруға қабылданды.

*Д. Т. Сулейменова¹, Ж. К. Оржанова²,
Т. В. Мецзякова³, А. А. Боканова⁴

¹Алматынський университет енергетики и связи имени

Гумарбека Даукеева,

Республика Казахстан, г. Алматы;

²АО «Алатау Жарық Компаниясы»,

Республика Казахстан, г. Алматы;

³Сатпаев университет,

Республика Казахстан, г. Алматы;

⁴Евразийский технологический университет,

Республика Казахстан, г. Алматы.

*e-mail: duriyasuleimenova@mail.ru

Поступило в редакцию 30.10.25.

Поступило с исправлениями 14.11.25.

Принято в печать 27.02.26.

АНАЛИЗ ПРИМЕНЕНИЯ ВЕРОЯТНОСТНО- СТАТИСТИЧЕСКИХ МЕТОДОВ ДЛЯ РАСЧЕТА ПОТЕРЬ ЭЛЕКТРОЭНЕРГИИ В РАСПРЕДЕЛИТЕЛЬНЫХ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ СЕТЯХ

Реформирование энергетической отрасли Казахстана, создание конкурентного рынка электрической энергии (ЭЭ) и мощности, введение новых нормативных документов в контексте условий потребления реактивной мощности (РМ) и оптимизации балансов РМ, вызвало особую актуальность по повышению эффективности энергетического сектора, уровню инвестирования и обеспечению минимальных потребительских тарифов.

Существенным показателем экономичности работы энергосистемы в целом и частных сетевых компаний является значение потерь ЭЭ. Точное и достоверное определение данного показателя режима работы имеет первостепенное значение при решении комплекса задач эксплуатации и управления электрическими сетями (ЭС). Основываясь на тщательных проведенных расчетах структуры потерь, фактических и допустимых небалансов электроэнергии осуществляется выбор приоритетных мероприятий по снижению технических и коммерческих потерь электроэнергии в распределительных электрических сетях. При этом требуется владеть информацией сезонных нагрузок электрических режимов (многорежимностью) формируемых системами контроля и контроля электропотреблением. В статье приведены графики сезонных нагрузок 2022-2024 гг. и суточных электрических нагрузок потребителей по току и активной мощности Р. Реактивная мощность Q, потери в ЭЭ, диапазоны измерения напряжений, перетоки мощности, выработка электроэнергии за определенный период, себестоимость ЭЭ и т.д. показаны в виде графиков с последующей обработкой и ранжировки (типовые графики, компоненты, математические модели). Вследствие того, что вычислительный анализ трудоемкий, необходимо ее интегрированное представление для практической реализации.

Статья посвящена актуальной проблеме – перспективности применения вероятностно-статистических методов для расчета потерь электрической энергии в распределительных сетях, базирующиеся на теории вероятности и математической статистики на основании данных нагрузок в электрических сетях.

Определение интегральных характеристик с учетом фактора многорежимности на основе моделирования электрических нагрузок, позволила сократить трудоемкость расчетов режимов, получить надежные результаты при решении задач оптимизации потоков реактивной мощности (РМ) и приведения уровней напряжения в соответствии с нормированными значениями в распределительных электрических сетях (РЭС).

Ключевые слова: распределительные сети, потери электроэнергии, электрические нагрузки, многорежимность, вероятностно-статистический метод, факторный анализ, графики нагрузок, уровни напряжения.

*D. T. Suleimenova¹, Zh. K. Orzhanova²,
T. V. Meshherjakova³, A. A. Bokanova⁴

¹Almaty University of Power Engineering and
Telecommunications named after Gumarbek Daukeyev,
Republic of Kazakhstan, Almaty;

²JSC «Alatau Zharyk Kompaniyasy»,
Republic of Kazakhstan, Almaty;

³Satpayev University,
Republic of Kazakhstan, Almaty;

⁴Eurasian Technological University,
Republic of Kazakhstan, Almaty.

*e-mail: duriyasuleimenova@mail.ru

Received 30.10.25.

Received in revised form 14.11.25.

Accepted for publication 27.02.26.

THEORETICAL MODEL OF FORMATION COMPETENCIES OF SOCIAL WORKERS THROUGH PROFESSIONAL DEVELOPMENT COURSES

The reform of Kazakhstan's energy sector, the creation of a competitive electric energy (EE) and capacity market, the introduction of new regulatory documents in the context of reactive power (RP) consumption conditions and the optimization of RP balance sheets have caused particular urgency in improving the efficiency of the energy sector, the level of investment and ensuring minimum consumer tariffs.

An essential indicator of the efficiency of the power system as a whole and of private grid companies is the value of EE losses. Accurate and reliable determination of this indicator of the operating mode is of paramount importance when solving a set of tasks for the operation and management of electrical networks (EN). Based on careful calculations of the loss structure, actual and permissible electricity imbalances, priority measures are being selected to reduce technical and commercial electricity losses in distribution electric networks. At the same time, it is required to have information about seasonal loads of electrical modes (multimode) generated by monitoring and power consumption control systems. The article presents graphs of seasonal loads in 2022-2024 and daily electrical loads of consumers in terms of current and active power R. Reactive power Q, losses in EE, voltage measurement ranges, power overflows, electricity generation over a certain period, cost of EE, etc. are shown in the form of graphs with subsequent processing and ranking (typical graphs, components, mathematical models). Due to the fact that computational analysis is time-consuming, its integrated representation is necessary for practical implementation.

The article is devoted to an urgent problem – the prospects of using probabilistic and statistical methods for calculating electrical energy losses in distribution networks based on probability theory and mathematical statistics based on load data in electrical networks. The determination of integral characteristics, taking into account the multimode factor based on modeling of electrical loads, made it possible to reduce the complexity of mode calculations, obtain reliable results when solving problems of optimizing reactive power flows (RP) and bringing voltage levels in accordance with normalized values in distribution electric networks (DEN).

Keywords: distribution networks, power losses, electrical loads, multimode, probabilistic and statistical method, factor analysis, load graphs, voltage levels.

МРНТИ 44.09.35

<https://doi.org/10.48081/BGQF1964>***Қ. Төребек¹, А. Кисманова², А. Турбекова³, А. Аджанов⁴**^{1,2,3,4}С. Сейфуллин атындағы Қазақ агротехникалық зерттеу университеті, Қазақстан Республикасы, Астана қ.¹ORCID: <https://orcid.org/0009-0001-3198-9806>²ORCID: <https://orcid.org/0009-0000-6150-0517>³ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-9689-4509>⁴ORCID: <https://orcid.org/0009-0008-3662-1833>*e-mail: kuandyktorebek@gmail.com

ИНФРАҚЫЗЫЛ БАСҚАРУ ЖҮЙЕСІ НЕГІЗІНДЕ ЖЫЛЖЫМАЛЫ РОБОТ ҚОЗҒАЛЫСЫН САҚТАУ ЖӘНЕ АВТОМАТТЫ ҚАЙТАЛАУ АЛГОРИТМІ

Бұл мақала инфрақызыл (IR) қашықтан басқару жүйесіне негізделген мобильді роботты басқару әдісін зерттеуге арналған. Зерттеу барысында робот қозғалысының параметрлерін сақтау және оларды кейін дәл қайта орындауға мүмкіндік беретін басқару архитектурасы әзірленіп, тәжірибелік тұрғыдан зерттелді. Ұсынылған жүйе Arduino UNO R3 микроконтроллері мен L293D мотор драйвері негізінде жүзеге асырылып, қозғалтқыштарды сенімді басқару және басқару сигналдарын тиімді өңдеу қамтамасыз етілді. Қашықтан басқару пультінен берілетін инфрақызыл сигналдар қабылдағыш модуль арқылы қабылданып, микроконтроллер көмегімен декодталып, роботтың қозғалыс жүйесін басқару командаларына түрлендіріледі. Робот қозғалысының бағыты, жылдамдығы және орындалу уақыты сияқты параметрлер арнайы жады массивтерінде сақталып, save/play қағидасы негізінде кейін автоматты түрде қайта орындалады. Бұл тәсіл роботтың алдын ала орындалған қозғалыс траекториясын жоғары дәлдікпен қайталауға мүмкіндік береді. Жүргізілген эксперименттік зерттеулер инфрақызыл басқару жүйесінің тұрақты жұмыс істейтінін, басқару сигналдарына жылдам жауап беретінін және робот қозғалысын сенімді түрде басқаруға мүмкіндік беретінін көрсетті. Сонымен қатар ұсынылған басқару жүйесінің интернет желісіне тәуелсіз жұмыс

істеуі роботтың автономдылығын арттырып, сыртқы желілік инфрақұрылымсыз тұрақты әрі қауіпсіз жұмыс істеуіне мүмкіндік береді. Зерттеу нәтижелері ұсынылған инфрақызыл басқару әдісінің робототехникада, зертханалық робот жүйелерінде, қойма автоматтандыруында, өнеркәсіптік робот платформаларында және автоматтандырылған жылыжай жүйелерінде тиімді қолданылуы мүмкін екенін көрсетті. Ұсынылған тәсіл мобильді роботтарды басқарудың қарапайым, энергия үнемдейтін және сенімді шешімін ұсынып, автономды робототехника мен өндірістік автоматтандыру жүйелерін дамытуға үлес қосады.

Кілтті сөздер: Мобильді робот, инфрақызыл басқару, Arduino платформасы, мотор драйвері, қозғалыс алгоритмі, автономды басқару, робототехника.

Кіріспе

Бүгінгі таңда жылжымалы роботтар түрлі салаларда кеңінен қолданылып келеді. Өндіріс, ауыл шаруашылығы, денсаулық сақтау, логистика және тұрмыстық қызмет көрсету салаларында робототехниканың маңызы артып, оның қолдану аясы ғарыштық зерттеулерден бастап күрделі өнеркәсіптік процестерді автоматтандыруға дейін кеңейіп отыр. Робототехниканың қарқынды дамуы сенсорлық технологиялардың сенімділігін арттырып, басқару алгоритмдерін жетілдіруге және құрылғылардың өзіндік құнын төмендетуге мүмкіндік береді. Бұл үдерістер роботтардың тиімділігін арттырып қана қоймай, олардың қауіпсіздігін қамтамасыз ететін жаңа әдістер мен шешімдерді әзірлеуге жол ашады [1, 145–159-бб.].

Соңғы жылдары роботтарды басқару жүйелерінде Заттар интернеті (IoT) және жасанды интеллект (AI) технологиялары кеңінен қолданыла бастады. IoT құрылғылары арқылы роботтар сенсорлық деректерді жинап, оларды желі арқылы өңдеу және талдау мүмкіндігіне ие болады. Ал жасанды интеллект алгоритмдері қоршаған ортаны талдауға, қозғалысты жоспарлауға және автономды шешім қабылдауға мүмкіндік береді. Мұндай технологиялардың үйлесуі робототехниканың жаңа деңгейге көтерілуіне ықпал етіп, интеллектуалды автоматтандырылған жүйелердің дамуына жол ашуда.

Заманауи робототехниканың даму тарихына көз жүгіртсек, алғашқы мобильді роботтардың бірі – Shakey маңызды жаңалықтардың бастауына айналды. Бұл робот қоршаған ортаны тану, қозғалысты жоспарлау және кедергілерді айналып өту мүмкіндігімен ерекшеленді. Кейіннен Pioneer 3-DX және Nomad сияқты роботтық платформалар сенсорлық жүйелер мен басқару алгоритмдерін жетілдіруге ықпал етті. Pioneer 3-DX – мобильді роботтық

платформа ретінде әртүрлі ортада сынақтан өтсе, Nomad географиялық және ғылыми зерттеулерге бейімделіп, күрделі жер бедерлерінде автономды жұмыс істеуге мүмкіндік алды. Мұндай технологиялық жетістіктер роботтардың көпфункционалдығын арттырып, оларды күрделі тапсырмаларды орындауға икемдеді [2, 5-6.].

Дегенмен, қазіргі роботтарды басқаруда IoT технологияларын қолдану бірқатар шектеулерге ие. Біріншіден, мұндай жүйелер тұрақты интернет байланысын қажет етеді, ал желінің әлсіздігі немесе болмауы роботтың қашықтан басқарылуын қиындатуы мүмкін. Екіншіден, IoT құрылғылары киберқауіпсіздік тұрғысынан сыртқы шабуылдарға осал болуы мүмкін, бұл маңызды деректердің қауіпсіздігіне қауіп төндіреді. Үшіншіден, интернетке қосылған құрылғылар тұрақты энергия тұтынуды талап етеді, бұл автономды жүйелердің жұмыс уақытын шектейді. Төртіншіден, әскери, өндірістік немесе төтенше жағдайлар сияқты ерекше орталарда интернет байланысының болмауы роботтарды басқаруды күрделендіреді.

Осы себептерге байланысты кейбір басқарылатын ортада роботтарды интернетке тәуелсіз басқару тәсілдерін қолдану өзекті болып табылады. Осындай балама шешімдердің бірі – инфрақызыл (IR) қашықтан басқару технологиясы. IR технологиясы қарапайымдылығымен, төмен энергия тұтынуымен және сенімді жұмыс істеуімен ерекшеленеді. Сонымен қатар, инфрақызыл сигналдардың шектеулі қашықтықта әрекет етуі жүйенің тұрақтылығын арттырып, киберқауіпсіздік деңгейін жоғарылатады.

Осы зерттеудің мақсаты – инфрақызыл (IR) басқару жүйесі негізінде жылжымалы роботтың қозғалыс күйін сақтау және оны автоматты түрде орындау әдісін әзірлеу. Ұсынылған тәсіл робот қозғалысының параметрлерін жазып алып, оларды кейін автономды режимде дәл қайталауға мүмкіндік береді. Зерттеу барысында Arduino UNO платформасы негізінде қозғалысты сақтау және қайта орындау алгоритмі әзірленді. Бағдарламалық қамтамасыз ету Arduino IDE 1.8.16 ортасында жүзеге асырылып, қозғалыс деректерін сақтау үшін save() функциясы, ал оларды қайта орындау үшін play() функциясы қолданылды. Ұсынылған әдістің тиімділігі Tinkercad виртуалды модельдеу ортасында тексеріліп, оның нақты ортада да сенімді жұмыс істейтіні анықталды.

Ұсынылған басқару әдісінің негізгі артықшылықтары – құрылымының қарапайымдылығы, төмен құны, сенімділігі және автономды басқару мүмкіндігі. Сонымен қатар, бұл тәсіл интернет байланысы жоқ жағдайларда роботтарды басқарудың тиімді баламасы ретінде қарастырылады. Зерттеу нәтижелері инфрақызыл басқару жүйесін робототехникада, өнеркәсіптік автоматтандыруда, логистикада және басқарылатын өндірістік орталарда

қолдануға болатынын көрсетеді. Зерттеудің ғылыми жаңалығы инфрақызыл қашықтан басқару сигналдарын қолдану арқылы жылжымалы роботтың қозғалыс параметрлерін массивтік құрылымда сақтау және оларды автоматты түрде қайта орындауға мүмкіндік беретін басқару алгоритмін ұсынумен сипатталады. Сонымен қатар PWM негізіндегі қозғалтқыштарды басқару мен инфрақызыл қашықтан басқару сигналдарын біріктіретін автономды басқару архитектурасы әзірленіп, save() және play() функциялары арқылы робот қозғалысының траекториясын алдын ала жазып, оны автономды режимде дәл қайталау әдісі жүзеге асырылды.

Материалдар мен әдістері

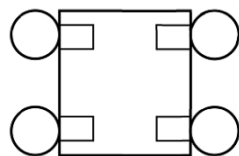
Қазіргі уақытта дөңгелекті жылжымалы роботтардың қозғаушы бөлігі ретінде тұрақты ток қозғалтқыштары, қадамдық қозғалтқыштар және баяулататын берілісі бар тұрақты ток қозғалтқыштары кеңінен қолданылады. Әрбір қозғалтқыштың техникалық сипаттамалары, артықшылықтары мен кемшіліктері зерттеліп, робот техникасында тиімді нұсқаны таңдау мәселесі қарастырылды.

Қарапайым әрі арзан тұрақты ток қозғалтқыштары жоғары жылдамдықпен жұмыс істегенімен, айналу моменті төмен болғандықтан, олар роботтарда шектеулі қолданылады. Ал қадамдық қозғалтқыштар жоғары дәлдікпен басқаруды қамтамасыз етеді, алайда олардың төмен жылдамдығы мен жоғары құны мобильді роботтар үшін тиімсіз шешімге айналады.

Осы факторларды ескере отырып, баяулататын берілісі бар тұрақты ток қозғалтқышы оңтайлы шешім ретінде таңдалды. Ол төмен жылдамдықта тұрақты жұмыс істеумен қатар, қажетті айналу моментін қамтамасыз етеді. Сонымен қатар, PWM (импульстік ені модуляциясы) арқылы басқару әдісі қарапайым әрі тиімді болып, оны жылжымалы роботтың негізгі қозғалтқышы ретінде пайдалануға мүмкіндік береді.

Роботтың шассиі оның тұрақтылығы мен модульдік құрылымын қамтамасыз етеді. Зерттеу барысында жоғары жүк көтергіштігі мен тұрақты қозғалысты қамтамасыз ету үшін төрт дөңгелекті шасси таңдалды. Айналу радиусының кең болуы маневрлік қабілетті шектей алатын болғанымен, роботтың негізгі міндеттері үшін бұл шешім оңтайлы деп танылды. Зерттеу барысында қолданылған төрт дөңгелекті мобильді роботтың шассиі 1 - суретте көрсетілген.

Қозғалыс жүйесінде DC 6V тұрақты ток қозғалтқыштары мен зеңке дөңгелектер қолданылды. Жоғары айналу моменті мен басқарудың қарапайымдылығы роботтың сенімділігін арттырып, тиімді жұмыс істеуіне мүмкіндік берді.



Сурет 1 – Төрт дөңгелекті жылжымалы роботтың шасси құрылымы

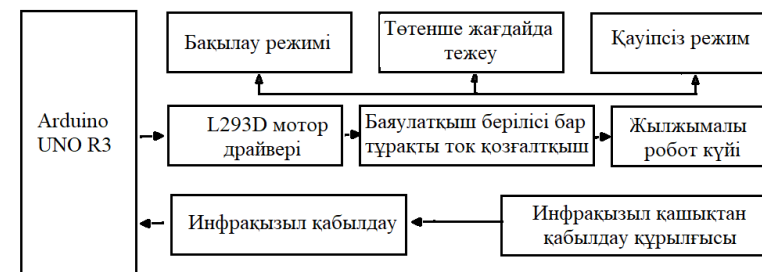
Суретте тәжірибелік зерттеуде қолданылған мобильді роботтың шасси құрылымы көрсетілген. Шасси төрт жетеТәжірибелік сынақтар барысында робот әртүрлі қозғалыс сценарийлерін орындап, олардың тұрақтылығы мен қайталану дәлдігі бағаланды.кші дөңгелектен, тұрақты ток қозғалтқыштарынан және басқару модулін орналастыруға арналған платформадан тұрады.

Зерттеу Arduino UNO R3 микроконтроллері негізінде жылжымалы роботтардың қозғалыс күйін сақтау және оны автоматты түрде қайталау әдісін әзірлеуге бағытталған. Роботтың аппараттық және бағдарламалық жүйелері құрастырылып, инфрақызыл қашықтан басқару арқылы басқару және қозғалыс деректерін сақтау мүмкіндігі жүзеге асырылды.

Arduino UNO R3 – сенімділігі мен тұрақтылығының арқасында робототехникалық жобаларда кеңінен қолданылатын микроконтроллер. Ол 14 цифрлық енгізу/шығару (I/O), 6 аналогтық кіріс және PWM пиндерімен жабдықталған, бұл оны қозғалтқыштар мен сенсорларды басқаруға ыңғайлы етеді. Роботтың қозғалыс алгоритмдері Arduino IDE бағдарламалау ортасында C/C++ тілдерінде әзірленді [3, 1–21-бб.].

Жүйенің жалпы құрылымы қарапайым, себебі инфрақызыл қашықтан басқару принципі аппараттық жабдыққа жоғары талап қоймайды және оңай іске асырылады. Алайда жобалау барысында Arduino микроконтроллерінің сыртқы және ішкі үзілістерін қолдану кезінде олардың арасындағы ықтимал кедергілерді болдырмауға назар аудару қажет [4, 271–273-бб.].

Жылжымалы робот жүйесінің жалпы құрылымы 2 - суретте көрсетілген.



Сурет 2 – Жылжымалы робот жүйесінің құрылымдық диаграммасы

Бұл жүйе бірнеше негізгі модульден тұрады: инфрақызыл кабылдау модулі, басқару модулі (Arduino UNO R3), мотор драйвері (L293D), қозғалтқыш модулі және электр қуат көзі.

Инфрақызыл қашықтан басқару құрылғысынан жіберілген сигнал алдымен инфрақызыл қабылдағыш арқылы Arduino контроллеріне беріледі. Контроллер қабылданған командаларды өңдеп, мотор драйверіне сәйкес басқару сигналдарын жібереді. Нәтижесінде қозғалтқыштардың жұмыс режимі өзгеріп, робот алға қозғалу, артқа жүру, бұрылу немесе тоқтау әрекеттерін орындайды.

Tinkercad платформасы роботтың виртуалды модельдеуін және алдын ала сынақтан өткізуін жүзеге асыру үшін қолданылды [5, 31-6.]. Бұл виртуалды ортада роботтың электрлік схемасы мен бағдарламалық коды тексеріліп, құрылымдық және бағдарламалық қателер алдын ала анықталды. Сонымен қатар, инфрақызыл қашықтан басқару жүйесінің жұмыс принципі мен басқару алгоритмдерінің дұрыстығы модельдеу барысында бағаланды. Мұндай тәсіл нақты құрылғыны құрастырмас бұрын жүйенің жұмыс қабілетін тексеруге мүмкіндік береді.

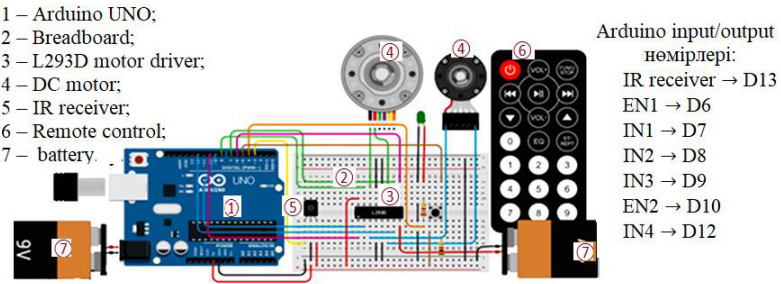
Arduino платформасының ашық бастапқы код архитектурасы, әртүрлі қуат көздерін қолдану мүмкіндігі (USB, тұрақты ток көзі, батарея) және кең пайдаланушы қауымдастығы жобаны тиімді жүзеге асыруға жағдай жасайды. Бұл факторлар роботтың тұрақты жұмысын қамтамасыз етіп, жүйенің икемділігі мен болашақта кеңейтілу мүмкіндігін арттырады [6, 27-б.].

Төрт дөңгелекті жылжымалы роботтың қозғалысы импульстік ені модуляциясы (PWM) технологиясына негізделген. Бұл әдіс қозғалтқыштардың жылдамдығы мен айналу бағытын дәл реттеуге мүмкіндік береді. PWM сигналының жұмыс циклі өзгерген сайын қозғалтқыштың айналу жылдамдығы да өзгереді: жұмыс циклі артқан сайын жылдамдық жоғарылайды, ал төмендеген кезде қозғалтқыш баяу жұмыс істейді.

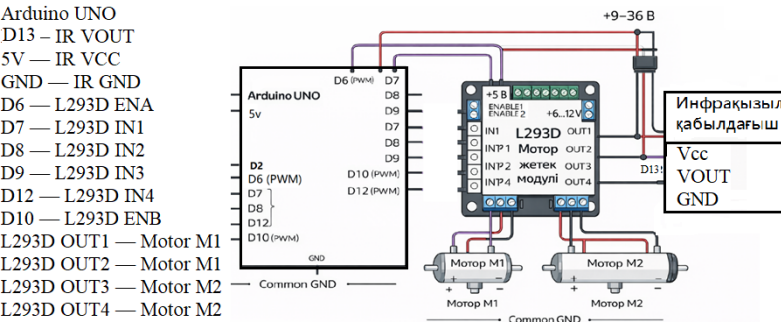
Роботтың қозғалысын басқару үшін Arduino UNO R3 микроконтроллері мен L293D мотор драйвері қолданылды. L293D драйвері қозғалтқыштардың бағыты мен жылдамдығын реттеп, Arduino микроконтроллерінен берілген басқару сигналдарын өңдейді. PWM сигналдарын пайдалану қозғалтқыштардың тиімді жұмысын қамтамасыз етіп, роботтың қозғалысын икемді және дәл басқаруға мүмкіндік береді [7, 56-6.].

Сымсыз басқару жүйесі ретінде инфрақызыл (IR) технологиясы қолданылды. Қашықтан басқару пультінен жіберілген сигнал инфрақызыл қабылдағыш арқылы Arduino микроконтроллеріне беріледі. Контроллер қабылданған командаларды өңдеп, мотор драйвері арқылы қозғалтқыштардың жұмыс режимін өзгертеді. Нәтижесінде робот алға қозғалу, артқа жүру, бұрылу немесе тоқтау сияқты әрекеттерді орындай алады.

Робот жүйесінің виртуалды модельдеу схемасы 3 - суретте, ал жүйенің электрлік принциптік сұлбасы 4 - суретте көрсетілген.



Сурет 3 – Робот жүйесінің виртуалды модельдеу схемасы (Tinkercad)



Сурет 4 – Arduino UNO, L293D мотор драйвері және инфрақызыл қабылдағыш негізіндегі мобильді роботтың электрлік принциптік сұлбасы

Жалпы алғанда, Arduino негізінде құрылған басқару жүйесі роботтың қозғалысын тиімді, сенімді және дәл басқаруға мүмкіндік береді. PWM технологиясы мен L293D мотор драйверінің үйлесімді жұмысы қозғалтқыштардың айналу жылдамдығы мен қозғалыс бағытын икемді реттеуді қамтамасыз етеді.

Жасалған робот тәжірибелік сынақтардан өткізілді. Сынақ барысында қозғалыс алгоритмдерінің тиімділігі және инфрақызыл қашықтан басқару жүйесінің жұмыс тұрақтылығы бағаланды. Алынған нәтижелер роботтың қозғалыс дәлдігі мен басқару жүйесінің сенімді жұмыс істейтінін көрсетті.

Нәтижелер және талқылау

Бұл бөлімде Arduino UNO R3 микроконтроллері мен L293D мотор драйвері негізінде құрастырылған төрт дөңгелекті мобильді роботтың инфрақызыл қашықтан басқару жүйесінің жұмыс тиімділігі, сондай-ақ қозғалыс параметрлерін сақтау және қайта орындау алгоритмінің эксперименттік нәтижелері талданады. Ұсынылған басқару жүйесінің негізгі мақсаты мобильді робот қозғалысын дәл басқару, басқару сигналдарын сенімді өңдеу және роботтың қозғалыс траекториясын кейін автономды түрде қайта орындау мүмкіндігін қамтамасыз ету болып табылады.

Роботтың қозғалтқыштарын басқару үшін қолданылатын сигналдардың логикалық құрылымы мен жұмыс режимдері 1-кестеде көрсетілген.

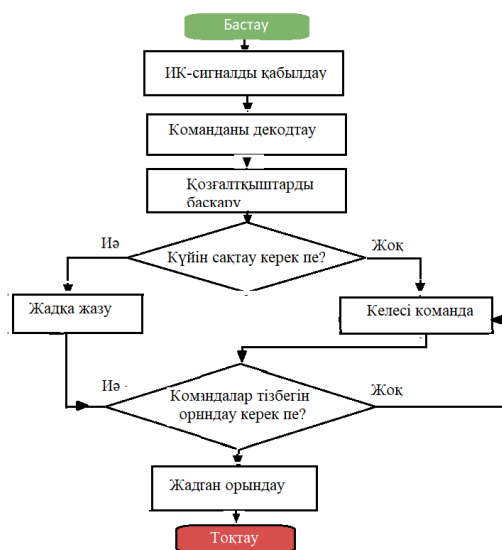
1-кесте – Мобильді робот қозғалысын басқаруға арналған L293D қозғалтқыш драйверінің басқару сигналдары

DC MOTOR	MOTOR operating status	ENABLE1	INPUT1	INPUT2	ENABLE2	INPUT3	INPUT4
M1(Motor)	оңға бұрылу	аналогтық мән беріледі	1	0	0	0	0
	солға бұрылу	аналогтық мән беріледі	0	1	0	0	0
	тоқтау	нөл	0	0	0	0	0
M2(Motor)	алға	0	0	0	аналогтық мән беріледі	1	0
	артқа	0	0	0	аналогтық мән беріледі	0	1
	тоқтау	0	0	0	нөл	0	0

Кестеде L293D мотор драйверінің басқару пиндеріне берілетін логикалық деңгейлер және PWM сигналдары арқылы қозғалтқыш жылдамдығын реттеу принциптері берілген. Қозғалтқыштардың айналу бағыты INPUT1–INPUT4 логикалық сигналдары арқылы анықталады, ал олардың айналу жылдамдығы ENABLE пиндеріне берілетін PWM сигналдары арқылы реттеледі. Мұндай басқару тәсілі роботтың қозғалысын дәл басқаруға және қозғалыс режимдерін тұрақты орындауға мүмкіндік береді.

Бағдарламалық қамтамасыз ету Arduino IDE 1.8.16 интеграцияланған әзірлеу ортасында жүзеге асырылды. Бағдарлама компиляцияланып және тексерілгеннен кейін Arduino UNO R3 микроконтроллеріне жүктеледі. Жүктеу аяқталғаннан кейін микроконтроллер автоматты түрде жұмыс режиміне көшіп, басқару алгоритмін орындай бастайды. Инфрақызыл қашықтан басқару сигналдарын қабылдау және өңдеу үшін IRremote дерекқоры қолданылды.

Робот қозғалысын басқарудың жалпы алгоритмі 5 – суретте көрсетілген.



Сурет 5 – Робот қозғалысын сақтау және қайта орындау алгоритмінің блок-схемасы

Бұл суретте инфрақызыл қашықтан басқару сигналдарын қабылдау, командаларды декодтау, қозғалтқыштарды басқару және қозғалыс

параметрлерін жадыға сақтау мен қайта орындау кезеңдерін қамтитын басқару алгоритмінің жалпы құрылымы көрсетілген.

Алгоритм инфрақызыл сигналды қабылдау және оны декодтау кезеңінен басталады. Одан кейін алынған басқару командасына сәйкес қозғалтқыштардың жұмыс режимі анықталып, роботтың қозғалысы жүзеге асырылады. Егер қозғалыс күйін сақтау қажет болса, ағымдағы басқару параметрлері жады массивіне жазылады. Ал қозғалыс тізбегін қайта орындау режимі таңдалған жағдайда робот бұрын сақталған қозғалыс параметрлерін жадтан оқып, оларды белгіленген ретпен автоматты түрде орындайды. Бұл алгоритм робот қозғалысының траекториясын сақтауға және оны кейін автономды режимде қайта жаңғыртуға мүмкіндік береді. Жоба барысында мобильді роботтың тәжірибелік прототипі құрастырылып, тәжірибелік сынақтар жүргізілді. Роботтың аппараттық құрылымы және негізгі басқару элементтері 6 -суретте көрсетілген.



Сурет 6 – Әзірленген мобильді робот платформасының эксперименттік прототипі.

Ұсынылған жүйенің аппараттық архитектурасы Arduino UNO R3 микроконтроллері, L293D мотор драйвері, breadboard макет тақшасы, инфрақызыл сигнал қабылдағыш және қосылу сымдарынан тұрады. Роботтың қозғалыс механизмі тұрақты ток қозғалтқыштары мен төрт дөңгелекті шассиден құралған. Сонымен қатар алдыңғы дөңгелектердің бұрылуын қамтамасыз ететін рульдік мотор роботтың маневрлік мүмкіндігін арттырады.

Тәжірибелік зерттеулер барысында мобильді роботтың негізгі жұмыс параметрлері өлшеніп, олардың тиімділігі бағаланды. Роботтың қозғалыс жылдамдығы, басқару командасына жауап беру уақыты, қозғалыс

траекториясын қайта орындау дәлдігі және инфрақызыл басқару жүйесінің жұмыс қашықтығы сияқты көрсеткіштер анықталды. Эксперимент нәтижелері 2-кестеде келтірілген.

2-кесте – Мобильді роботтың эксперименттік сынақ нәтижелері

№	Сынақ параметрі	Өлшем бірлігі	Нәтиже	Ескерту
1	Роботтың максималды жылдамдығы	м/с	0.42	PWM = 130 кезінде
2	Командаға жауап беру уақыты	мс	85	IR сигнал қабылдау уақыты
3	Қозғалыс траекториясын қайталау дәлдігі	%	94	save/play алгоритмі
4	Қашықтан басқару қашықтығы	м	8	Ашық кеңістікте
5	Қозғалыс сценарийін сақтау саны.	команда	40	Массив көлемімен шектеледі
6	Роботтың бұрылу бұрышы	градус	±35°	Рульдік мотор
7	Қозғалтқыш жылдамдығын реттеу диапазоны	PWM	0–255	Arduino PWM

Бұл кестеде мобильді роботтың негізгі эксперименттік сипаттамалары көрсетілген, оның ішінде қозғалыс жылдамдығы, басқару командасына жауап беру уақыты, қозғалыс траекториясын қайта орындау дәлдігі және инфрақызыл басқару жүйесінің жұмыс қашықтығы берілген.

Өлшеу нәтижелері бойынша роботтың максималды қозғалыс жылдамдығы 0.42 м/с екені анықталды. Сонымен қатар басқару командасына жүйенің жауап беру уақыты шамамен 85 мс құрады, бұл инфрақызыл сигналдарды қабылдау және өңдеу жүйесінің жеткілікті жылдам жұмыс істейтінін көрсетеді. Save/play алгоритмін қолдану арқылы роботтың қозғалыс траекториясын қайта орындау дәлдігі 94 % деңгейінде екені анықталды. Бұл қозғалыс параметрлерін сақтау және қайта орындау әдісінің тиімділігін көрсетеді.

Сонымен қатар тәжірибелер инфрақызыл басқару жүйесінің тұрақты жұмыс қашықтығы шамамен 8 м екенін көрсетті. PWM технологиясы қозғалтқыштардың айналу жылдамдығын 0–255 диапазонында реттеуге

мүмкіндік береді, бұл робот қозғалысының икемді және дәл басқарылуын қамтамасыз етеді. Роботтың қозғалыс сценарийлерін сақтау мүмкіндігі 40 басқару командасымен шектеледі, бұл жады массивінің көлемімен анықталады.

Ұсынылған инфрақызыл басқару жүйесінің ерекшеліктерін бағалау мақсатында оны IoT негізіндегі басқару жүйелерімен салыстырмалы талдау жүргізілді. Салыстыру нәтижелері 3-кестеде көрсетілген.

Кесте 3 – Инфрақызыл басқару және IoT негізіндегі роботты басқару жүйелерінің салыстырмалы талдауы

№	Параметр	Инфрақызыл басқару	IoT басқару жүйесі
1	Байланыс технологиясы	Инфрақызыл сигнал	Wi-Fi / Интернет
2	Интернетке тәуелділік	Тәуелсіз	Интернет қажет
3	Басқару қашықтығы	5–10 м	Интернетке байланысты шексіз
4	Жауап беру уақыты	Өте жылдам (мс деңгейінде)	Желінің кідірісіне байланысты
5	Аппараттық күрделілік	Қарапайым	Күрделі
6	Энергия тұтыну	Төмен	Орташа
7	Қолдану аймағы	Зертхана, өндіріс, жабық орта	Ақылды жүйелер, қашықтан бақылау
8	Жүйе тұрақтылығы	Жоғары (локалды)	Желінің сапасына тәуелді

Кесте 3 – Инфрақызыл басқару және IoT негізіндегі роботты басқару жүйелерінің салыстырмалы талдауы

Бұл кестеде инфрақызыл басқару жүйесі мен IoT негізіндегі басқару жүйелерінің негізгі сипаттамалары салыстырылған. Салыстыру байланыс технологиясы, басқару қашықтығы, жауап беру уақыты, аппараттық күрделілік және жүйе тұрақтылығы сияқты параметрлер бойынша жүргізілген.

Салыстырмалы талдау инфрақызыл басқару жүйесінің негізгі артықшылықтары оның қарапайым архитектурасы, интернет желісіне тәуелсіз жұмыс істеуі және басқару сигналының жылдам берілуі екенін көрсетеді. Мұндай жүйелер локалды басқару қажет болатын жағдайларда,

мысалы зертханалық робот жүйелерінде немесе өндірістік автоматтандыру жүйелерінде тиімді қолданылуы мүмкін.

Ал IoT негізіндегі басқару жүйелері роботты үлкен қашықтықтан басқаруға мүмкіндік береді, алайда олардың жұмыс тиімділігі интернет байланысының тұрақтылығына тәуелді болады. Сонымен қатар IoT жүйелері аппараттық және бағдарламалық тұрғыдан күрделірек болып келеді.

Ұсынылған басқару әдісінің маңызды артықшылықтарының бірі – оның автономдылығы болып табылады. Инфрақызыл басқару жүйесі сыртқы желілік инфрақұрылымға тәуелсіз жұмыс істей алады, бұл жүйенің сенімділігін арттырады және интернет байланысы шектеулі ортада роботтарды басқаруға мүмкіндік береді.

Сонымен қатар инфрақызыл басқару технологиясының белгілі бір шектеулері де бар. Атап айтқанда, инфрақызыл сигналдардың тұрақты қабылдануы үшін жібергіш пен қабылдағыш арасында тікелей көріну аймағының болуы қажет. Бұдан бөлек, күшті жарық көздері немесе сыртқы инфрақызыл сәулелер сигнал қабылдау сапасына әсер етуі мүмкін. Дегенмен зертханалық робот жүйелері, өндірістік желілер немесе қоймалар сияқты жабық және басқарылатын орталарда бұл факторлардың әсері айтарлықтай төмен болады.

Осылайша жүргізілген эксперименттік зерттеулер ұсынылған инфрақызыл басқару жүйесінің мобильді робот қозғалысын дәл әрі тұрақты басқаруға мүмкіндік беретінін көрсетті. Сонымен қатар ұсынылған save/play қозғалыс алгоритмі робот қозғалыс траекториясын сенімді түрде сақтап, оны кейін автономды режимде қайта орындауға мүмкіндік береді. Бұл тәсіл қайталанатын операцияларды автоматтандыруда, робот қозғалыс алгоритмдерін тестілеуде және автономды робот жүйелерін зерттеуде тиімді қолданылуы мүмкін.

Зерттеудің негізгі ғылыми жаңалығы инфрақызыл қашықтан басқару жүйесі мен қозғалыс параметрлерін сақтау және қайта орындау алгоритмін біріктіретін басқару архитектурасын ұсыну болып табылады. Ұсынылған алгоритм робот қозғалысының бағыттарын, жылдамдық параметрлерін және уақыт интервалдарын тіркеп, оларды кейін автоматты түрде қайта орындауға мүмкіндік береді. Бұл тәсіл мобильді роботтардың қозғалыс сценарийлерін автоматтандыру және басқару алгоритмдерін тәжірибелік зерттеулерде тиімді сынақтан өткізу үшін жаңа мүмкіндіктер ұсынады.

Қорытынды

Бұл жұмыста инфрақызыл қашықтан басқару технологиясына негізделген мобильді роботтың қозғалысын басқару және оның қозғалыс параметрлерін сақтап, кейін автоматты түрде қайта орындауға мүмкіндік

беретін автономды басқару әдісі ұсынылды. Ұсынылған басқару архитектурасы микроконтроллерлік платформа негізінде жүзеге асырылып, қозғалтқыштарды басқару, басқару сигналдарын өңдеу және қозғалыс сценарийлерін жады құрылымында тіркеу механизмдерін біріктіретін алгоритмдік тәсіл әзірленді. Бұл тәсіл мобильді роботтың қозғалыс траекториясын алдын ала жазып алып, оны кейін автономды режимде дәл қайта орындауға мүмкіндік береді.

Зерттеу нәтижелері ұсынылған басқару алгоритмінің мобильді робот қозғалысын ұйымдастыруда тиімді әдістемелік шешім ұсынатынын көрсетті. Қозғалыс сценарийлерін сақтау және қайта орындау мүмкіндігі робот жүйелерінің жұмыс алгоритмдерін эксперименттік зерттеулерде тексеруге, қайталанатын операцияларды автоматтандыруға және автономды басқару жүйелерін сынақтан өткізуге жағдай жасайды. Сонымен қатар инфрақызыл басқару технологиясының қарапайым архитектурасы мен интернет желісіне тәуелсіз жұмыс істеу мүмкіндігі локалды басқару қажет болатын роботтық жүйелер үшін сенімді және тиімді шешім болып табылады.

Ұсынылған автономды басқару әдісі мобильді робототехника саласында ғана емес, автоматтандырылған жүйелерді зерттеу және басқару алгоритмдерін тәжірибелік тексеру бағытында да қолданылуы мүмкін. Атап айтқанда, бұл тәсіл зертханалық робот жүйелерінде, өндірістік автоматтандыруда, логистикалық робот платформаларында және интеллектуалды агротехнологиялық жүйелерде қолданылатын автоматтандырылған құрылғыларды басқару алгоритмдерін әзірлеу мен сынақтан өткізу барысында пайдаланылуы ықтимал. Соның ішінде мұндай басқару қағидалары SMART жылыжайларда қолданылатын мобильді құрылғылардың немесе автоматтандырылған механизмдердің басқару жүйелерін зерттеу үшін қолданбалы әдістемелік негіз ретінде қарастырылуы мүмкін.

Жалпы алғанда, ұсынылған басқару архитектурасы мобильді роботтардың қозғалыс сценарийлерін автоматтандыруға бағытталған қарапайым әрі тиімді алгоритмдік шешім ұсынады және автономды роботтық жүйелерді әзірлеу мен зерттеу жұмыстарында қолданбалы маңызы бар нәтижелер береді.

Пайдаланылған деректер тізімі

1 Zhang, W., Sun, X. A reliable path following algorithms for autonomous robots in dynamic environments [Text]. – Intelligent & Robotic Systems. – 2016. – Vol. 53, No. 3. – P. 145–159.

2 **Miller, L.** Arduino for Robotics : Practical Projects for Hobbyists and Engineers [Text]. Paskt Publishing : Textbook. – 2018. – 540 p.

3 **Jeremy, Bloom.** Exploring Arduino: A Handbook of Tools and Techniques for Engineering Excellence [Text]. – 2019. – 478p. <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/book/10.1002/9781119405320>

4 **Qiu, R.** Research on the Structure and Design of an Automotive Distance Measurement and Hazard Warning System [Text]. – China Microcomputer Information – 2007. – Vol. 23, No. 6-2. – P. 271 – 273.

5 Tinkercad User Manual. Creating and Simulating Robots with Tinkercad. – Autodesk – 2023. <https://www.tinkercad.com/blog/robotics>

6 **Saran, D.** Designing and Simulating Robots Using Arduino and Tinkercad [Text]. – In Tech Open – 2020. – P. 27–31.

7 **Banzi, M., Shiloh, M.** Getting Started with Arduino (3rd ed.) [Text]. – Maker Media, Inc. – 2014. – 237 p. https://barreirolab.com/wpcontent/uploads/2016/12/c0ee2make_getting_started_with_arduino_3e_9781449363338.pdf

8 **Lee, H., Park, S.** Infrared Remote Control Systems for Robots: A Review [Text]. – International Journal of Robotics. – 2017.15(2). – P. 105–112.

9 **Төребек, К.** Ардуино технологиясына негізінде қашықтан сымсыз басқарылатын дөңгелекті мобильді роботтың жобасы [Текст]. Халықаралық ғылыми-теориялық конф. «Сейфуллин оқулары – 18» –Астана: С. КазАТУ. – 2022. 315–318 б.

10 **Chrysanthos, M.** Incorporating Artificial Intelligence Technology in Smart Greenhouses: Current State of the Art [Text]. Appl. Sci. –2023. – P.27–35. <https://doi.org/10.3390/app13010014>

References

1 **Zhang, W., Sun, X.** A reliable path following algorithms for autonomous robots in dynamic environments [Text]. – Intelligent & Robotic Systems. – 2016. – Vol. 53, No. 3. – P. 145–159.

2 **Miller, L.** Arduino for Robotics : Practical Projects for Hobbyists and Engineers [Text]. – Paskt Publishing: Textbook – 2018. – 2018. – 540 p.

3 **Jeremy, Bloom.** Exploring Arduino : A Handbook of Tools and Techniques for Engineering Excellence [Text]. Textbook – 2019. – 478 p. <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/book/10.1002/9781119405320>

4 **Qiu, R.** Research on the Structure and Design of an Automotive Distance Measurement and Hazard Warning System [Text]. – China Microcomputer Information – 2007. – Vol. 23, No. 6-2. – P. 271–273.

5 Tinkercad User Manual. Creating and Simulating Robots with Tinkercad. – Autodesk – 2023. <https://www.tinkercad.com/blog/robotics>

6 **Saran, D.** Designing and Simulating Robots Using Arduino and Tinkercad [Text]. – In Tech Open – 2020. – P. 27–31.

7 **Banzi, M., Shiloh, M.** Getting Started with Arduino (3rd ed.) [Text]. – Maker Media, Inc. – 2014. – 237 p. https://barreirolab.com/wpcontent/uploads/2016/12/c0ee2make_getting_started_with_arduino_3e_9781449363338.pdf

8 **Lee, H., Park, S.** Infrared Remote Control Systems for Robots: A Review [Text]. – International Journal of Robotics. – 2017.15(2). – P. 105–112.

9 **Torebek, K.** Arduino texnologiyasynda negizdelgen qashyqtan symyz basqarylatyn döngелекті mobilді robottyñ joğasy [Design of a Wheel-Based Mobile Robot Wirelessly Controlled Remotely Using Arduino Technology] [Text]. – International Scientific-Theoretical Conference «Seifullin Readings – 18» – Astana : S. Seifullin Kazakh Agrotechnical University – 2022. – P. 315 – 318.

10 **Chrysanthos, M.** Incorporating Artificial Intelligence Technology in Smart Greenhouses: Current State of the Art [Text]. – Appl. Sci. – 2023. – P. 27 – 35. <https://doi.org/10.3390/app13010014>

03.10.25 ж. баспаға түсті.

10.11.25 ж. түзетулерімен түсті.

27.02.26 ж. басып шығаруға қабылданды.

*К. Төребек¹, А. Кисманова², А. Торбекова³, А. Аджанов⁴

^{1,2,3,4}Казахский агротехнический исследовательский

университет имени С. Сейфуллина,

Республика Казахстан, г. Астана.

Поступило в редакцию 03.10.25.

Поступило с исправлениями 10.11.25.

Принято в печать 27.02.26.

АЛГОРИТМ СОХРАНЕНИЯ И ПОВТОРЕНИЯ ДВИЖЕНИЯ МОБИЛЬНОГО РОБОТА НА ОСНОВЕ ИНФРАКРАСНОЙ СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ

Данная статья посвящена исследованию метода управления мобильным роботом на основе инфракрасной (IR) системы дистанционного управления. В работе разработана и экспериментально исследована архитектура управления, позволяющая сохранять параметры движения робота и воспроизводить их с

высокой точностью. Предложенная система реализована на базе микроконтроллера Arduino UNO R3 и драйвера двигателей L293D, что обеспечивает надежное управление электродвигателями и эффективную обработку управляющих сигналов. Инфракрасные сигналы, передаваемые с пульта дистанционного управления, принимаются инфракрасным приемным модулем, декодируются микроконтроллером и преобразуются в управляющие команды для системы движения робота. Параметры движения робота, включая направление, скорость и временные интервалы выполнения команд, сохраняются в массивах памяти и впоследствии автоматически воспроизводятся на основе принципа save/play. Такой подход позволяет роботу с высокой точностью повторять ранее выполненную траекторию движения. Экспериментальные исследования показали, что предложенная инфракрасная система управления обеспечивает стабильную работу, высокую скорость реакции на управляющие сигналы и надежное управление движением мобильного робота. Кроме того, система функционирует независимо от интернет-соединения, что повышает автономность робота и обеспечивает его стабильную и безопасную работу без использования внешней сетевой инфраструктуры. Полученные результаты свидетельствуют о том, что предложенный метод инфракрасного управления может эффективно применяться в различных областях робототехники, включая лабораторные роботизированные системы, автоматизацию складских комплексов, промышленные роботизированные платформы и автоматизированные тепличные системы. Разработанный подход представляет собой простое, энергоэффективное и надежное решение для управления мобильными роботами и способствует дальнейшему развитию автономных робототехнических и автоматизированных систем.

Ключевые слова: Мобильный робот, инфракрасное управление, платформа Arduino, драйвер двигателя, алгоритм движения, автономное управление, робототехника.

*K. Torebek¹, A. Kismanova², A. Turbekova³, A. Adzhanov⁴

^{1,2,3,4}S. Seifullin Kazakh Agrotechnical Research University, Republic of Kazakhstan, Astana.

Received 03.10.25.

Received in revised form 10.11.25.

Accepted for publication 27.02.26.

АВТОРЛАР ТУРАЛЫ АҚПАРАТ

Аджанов Айтуған, техника ғылымдарының кандидаты, қауымд. профессор, С. Сейфуллин атындағы Қазақ агротехникалық зерттеу университетінің «Электр жабдықтарын пайдалану» кафедрасы, Астана қ., 010011, Қазақстан Республикасы, e-mail: a.adjanov@gmail.com, <https://orcid.org/0009-0008-3662-1833>

Азаматов Мурат Токтарбекович, «Автоматтандыру және басқару» мамандығы бойынша докторант, Энергетика факультеті, Торайғыров университеті, Павлодар қ., 140008, Қазақстан Республикасы, e-mail: muratazamatov@mail.ru, <https://orcid.org/0009-0007-6956-0822>

Айдымбаева Жанар Абдешевна, PhD докторы, доцент «Ғұмарбек Даукеев атындағы Алматы энергетика және байланыс университеті» КеАҚ, Алматы қ., 050013, Қазақстан Республикасы, e-mail: diararu@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0002-6908-7170>

Айтмагамбетова Маралгүл Борамбаевна, техника ғылымдарының магистры, аға оқытушы, Энергетика институты, С. Сейфуллин атындағы Қазақ агротехникалық зерттеу университеті, Астана қ., 010000, Қазақстан Республикасы, e-mail: aiti.mb@yandex.kz, <https://orcid.org/0000-0002-7443-9708>

Айтулина Айжан Мингожановна, аға оқытушы, Инженерлік және сандық технологиялар факультеті, «М. Қозыбаев атындағы, Солтүстік Қазақстан университеті», Петропавл қ., 150000, Республика Казахстан, e-mail: o_aizhan@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0002-9134-3783>

Акишев Каршыға, техника ғылымдарының кандидаты, (доцент), «Компьютерлік инженерия және автоматтандыру» кафедрасының меңгерушісі, Қ. Құлажанов атындағы Қазақ технология және бизнес университеті, технология факультеті, Астана қ., 010000, Қазақстан Республикасы, e-mail: akmail04cx@mail.ru, <http://orcid.org/0000-0001-5202-3501>

Акишева Ленара, 10 сынып тыңдаушысы, Назарбаев Зияткерлік мектебі, Астана қ., 010000, Қазақстан Республикасы, e-mail: L.Aks@gmail.com, <http://orcid.org/0009-0008-1214-0867>

Ануарбеков Максат Арғанатович, PhD докторы, аға оқытушы, Энергетика институты, «С. Сейфуллин атындағы Қазақ агротехникалық зерттеу университеті» КЕАҚ, Астана қ., 010000, Қазақстан Республикасы, e-mail: anuarbekov1495@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0002-9483-7105>

Арысгул Турбекова, ауыл шаруашылығы ғылымдарының кандидаты, қауымд. профессор, С. Сейфуллин атындағы Қазақ агротехникалық зерттеу

технологиялық университеті, Орал қ., 090006, Қазақстан Республикасы e-mail: nurslu_1986@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0003-0440-5948>

Бурумбаев Азамат Галимжанович, PhD докторант, Қарағанды техникалық университеті, Теміртау қ., 101400, Қазақстан Республикасы, Кіші ғылыми қызметкер, Ж. Әбішев атындағы Химия-металлургия институты, Қарағанды қ., 100009, Қазақстан Республикасы, e-mail: a.burumbayev@ttu.edu.kz, <https://orcid.org/0000-0001-5276-2259>

Валерий Юрьевич Максимов, PhD, профессор, әл-Фараби атындағы Қазақ ұлттық университеті, Алматы қ., 050040, Қазақстан Республикасы, e-mail: valeriy.maximov@kaznu.kz, <https://orcid.org/0000-0003-4120-1071>

Генбач Александр Алексеевич, техникалық ғылым докторы, «Жылуэнергетика және Физика» кафедрасының профессор, Энергетика және жасыл технологиялар институты, Ф. Даукеев атындағы Алматы Энергетика және Байланыс Университеті, Алматы қ., 050013, Қазақстан Республикасы, e-mail: a.genbach@aes.kz, <https://orcid.org/0009-0001-3819-4387>

Генбач Анна Александровна, оқытушы, Мәскеу облысының мемлекеттік бюджеттік кәсіптік білім беру мекемесі Можайск техникалық колледжі, Мәскеу облысы, Можайск қалалық округі, Строитель қ., 143203, Ресей Федерациясы, e-mail: anngenbach@gmail.com, <https://orcid.org/0009-0004-1255-6230>

Григоренко Ольга Викторовна, доцент, Жоғары математика кафедрасының меңгерушісі, Сібір мемлекеттік геожүйелер және технологиялар университеті, Новосибирск қ., 630108, Ресей Федерациясы, e-mail: ogrigorenko2311@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0001-8957-8746>

Даулетханова Алуа Муратқанқызы, «Энергетика» кафедрасының докторанты, «Қ. И. Сәтбаев атындағы Қазақ ұлттық зерттеу техникалық университеті» КЕАҚ (ҚазҰТУ), Алматы қ., 050013, Қазақстан Республикасы, e-mail: a.dauletkhanova@satbayev.university, <https://orcid.org/0000-0003-3459-6167>

Дауренова Индира Мәлікқызы, докторант, «Энергетика және электротехника» кафедрасы, Қазақ ұлттық аграрлық зерттеу университеті, Алматы қ., Қазақстан Республикасы; аға оқытушы, «Электр энергетикасы» кафедрасы, Г. Даукеев атындағы Алматы энергетика және байланыс университеті, Алматы қ., 050031/A10A9B4 Қазақстан Республикасы, e-mail: indikow-88-kz@mail.ru, <https://orcid.org/0009-0001-0155-6954>

Димаш Дауренұлы Токтаров, «Жылу энергетикасы» мамандығы бойынша докторант, әл-Фараби атындағы Қазақ ұлттық университеті, Алматы қ., 050040, Қазақстан Республикасы, e-mail: toktarow@gmail.com, <https://orcid.org/0009-0005-9557-9012>

Динмуханбетова Айгуль Жумагельдыевна, PhD докторы, қауымд. профессор, Энергетика факультеті, Торайғыров университеті, Павлодар қ., 140008, Қазақстан Республикасы, e-mail: ardi100909@mail.ru, <https://orcid.org/0009-0006-4538-9672>

Досаев Балтабек Имангалиевич, «Жылуэнергетика» мамандығы бойынша докторант, Энергетика факультеті, Торайғыров университеті, Павлодар қ., 140008, Қазақстан Республикасы, e-mail: baltabek_dossaev@icloud.com, <https://orcid.org/0009-0005-0208-9912>

Драганова Маргарита Анатольевна, магистр, «Энергетикалық жүйелер» кафедрасының аға оқытушысы, Әбілқас Сағынов атындағы Қарағанды техникалық университеті, Қарағанды қ., 100008, Қазақстан Республикасы, e-mail: margo_anton@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0002-8973-2958>

Дүйсенбек Жансая Серікқызы, PhD, қауымд. профессор, Г. Даукеев атындағы Алматы энергетика және байланыс университеті, Алматы қ., 050013, Қазақстан Республикасы, e-mail: zhaniko.adina@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0001-7844-4240>

Дюсова Ризагуль Муслимовна, техника ғылымдарының кандидаты, докторантураның ғылыми қызметкері, Павлодар қ., 140000, Қазақстан Республикасы, e-mail: rizagul.dyussova@gmail.com, <https://orcid.org/0000-0003-3083-5255>

Ербаев Ербол Тулегенович, PhD, доцент, «Жәңгір хан атындағы Батыс Қазақстан аграрлық-техникалық университеті» ҚЕАҚ, Орал қ., 090009, Қазақстан Республикасы, e-mail: erbol.erbaev@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0002-3186-9994>

Ергалиев Азамат Багдатович, «Электротехника және автоматтандыру» кафедрасының оқытушы-ассистенті, Торайғыров университеті, Энергетика факультеті, Павлодар қ., 140008, Қазақстан Республикасы, e-mail: vergaliyev10@gmail.com, <https://orcid.org/0009-0001-1315-2615>

Әбілдаева Айман Станбекқызы, аға оқытушы, М. Х. Дулати атындағы Тараз университеті, Тараз қ., 080000, Қазақстан Республикасы, e-mail: Abildayeva65@internet.ru, <https://orcid.org/0000-0002-3752-5607>

Жалмағамбетова Ұлтуар Каирбулатқызы, PhD, «Жылуэнергетика» кафедрасының профессоры, факультет Энергетика, 140008, Қазақстан Республикасы, Павлодар қ., e-mail: ultuara@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0002-2261-2222>

Жанпейісова Айжан Орынбекқызы, PhD студенті, Қ. И. Сәтбаев атындағы Қазақ ұлттық зерттеу техникалық университеті (ҚазҰЗТУ),

Алматы қ., 050013, Қазақстан Республикасы, e-mail: Ayzhan.zhanpeisova@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0001-5040-428X>

Жапбасбаев Ұзақ Қайырбекұлы, техника ғылымдарының докторы, профессор, «Энергетикадағы модельдеу» ғылыми-өндірістік зертханасының меңгерушісі, Қ. И. Сәтбаев атындағы Қазақ ұлттық техникалық зерттеу университеті, Алматы қ., 050013, Қазақстан Республикасы, e-mail: uzak.zh@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0001-5973-5149>

Зия Ур Рехман, «Химия» кафедрасының профессоры, Куэйд-и-Азам университеті, Исламабад қ., 45320, Пәкістан Ислам Республикасы, e-mail: zrehman@gau.edu.pk, <https://orcid.org/0000-0002-1436-3131>

Исабеков Даурен Джамбулович, PhD, профессор, Энергетика факультеті, Торайғыров университеті, Павлодар қ., 140008, Қазақстан Республикасы, e-mail: Dauren_pvl2012@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0002-6673-5646>

Исабеков Жанат Бейсембайұлы, PhD, қауымд. профессор (доцент), «Электротехника және автоматтандыру» кафедрасының меңгерушісі, Энергетика факультеті, Торайғыров университеті, Павлодар қ., 140008, Қазақстан Республикасы, e-mail: zh_is@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0003-3980-1617>

Исабекова Бибігүл Бейсембайқызы, PhD, қауымд. профессор (доцент), Computer science факультеті, Торайғыров университеті, Павлодар қ., 140008, Қазақстан Республикасы, e-mail: asbizh@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0001-5044-3211>

Исаев Сағи, жаратылыстану ғылымдарының магистрі, аға оқытушы, «Қолданбалы информатика және бағдарламалау» кафедрасы, Тараз өңірлік университеті, Тараз қ., 080000, Қазақстан Республикасы, e-mail: sagiissayev.1993kz@gmail.com, <https://orcid.org/0009-0008-0988-0952>

Калтаев Абдулла Габдылмананұлы, PhD, қауымд. профессор (доцент), Торайғыров университеті, Павлодар қ., 140008, Қазақстан Республикасы, e-mail: abdulla911@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0003-1684-3347>

Камарова Сәуле Нуртазевна, PhD, Қарағанды индустриялық университетінің Энергетика кафедрасының доценті, Қарағанды облысы, Теміртау қ., 101400, Қазақстан Республикасы, e-mail: cfekt.rfvfhjdf@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0001-8464-7204>

Кинжибекова Акмарал Кабиденовна, Профессор, Энергетика факультеті, Торайғыров университеті, Павлодар қ., 140008, Қазақстан Республикасы, e-mail: akmaral70@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0001-5839-3001>

Кисманова Айгерім, техника ғылымдарының кандидаты, қауымд. профессор, С. Сейфуллин атындағы Қазақ агротехникалық зерттеу университетінің «Электр жабдықтарын пайдалану» кафедрасы, Астана қ., 010011, Қазақстан Республикасы, e-mail: Kismanova08@mail.ru, <https://orcid.org/0009-0000-6150-0517>

Каласов Нұрдәулет Болатұлы, PhD, доцент м.а, физика-техникалық факультетінің оқытушысы, Әл-Фараби атындағы Қазақ Ұлттық Университеті, Алматы қ., 050040, Қазақстан Республикасы, e-mail: kalasov.nurdaulet@gmail.com, <https://orcid.org/0000-0003-3709-5544>

Қожагелді Болат Жарылқапұлы, техника ғылымының кандидаты, қауымд. профессор (доцент), «Энергетика» білім беру бағдарламасының жетекшісі, Қазақ ұлттық су шаруашылығы және ирригация университеті, Тараз қ., 080013, Қазақстан Республикасы, e-mail: bolat.kozhageldi@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0001-9697-6312>

Қойшиев Темірхан Қосыбайұлы, техника ғылымының докторы, профессор, Плазма физикасы, нанотехнология және компьютерлік физика кафедрасы, Физика-техникалық факультеті, Әл-Фараби атындағы Қазақ Ұлттық университеті, Алматы қ., 50040, Қазақстан Республикасы, e-mail: Temirkhan.Koishiyev@kaznu.edu.kz, <https://orcid.org/0000-0002-5320-6243>

Куандық Төребек, PhD докторант, «Техникалық жүйелерді басқару (8D07107)» білім беру бағдарламасы, энергетикалық факультеті, С. Сейфуллин атындағы Қазақ агротехникалық университеті, Астана қ., 010011, Қазақстан Республикасы, e-mail: kuandyktorebek@gmail.com, <https://orcid.org/0009-0001-3198-9806>

Куатова Анар Сталовна, докторант, электрмен жабдықтау кафедрасы, С. Сейфуллин атындағы Қазақ агротехникалық зерттеу университеті, Астана қ., 010000, Қазақстан Республикасы, e-mail: anarkuatova2019@gmail.com, <https://orcid.org/0000-0001-8972-1346>

Ларкин Виктор Александрович, «СевКазЭнергоПром» ҒӨК ЖШС бас директорының өндіріс жөніндегі орынбасары, Павлодар қ., 140006, Қазақстан Республикасы, e-mail: v.larkin@skep.kz, <https://orcid.org/0009-0008-2079-3358>

Махамбетов Ерболат Нысаналыұлы, PhD, қауымд. профессор, Ж. Әбішев атындағы Химия-металлургия институты, Қарағанды қ., 100009, Қазақстан Республикасы, e-mail: m.ye.n@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0001-8613-9932>

Маханова Махмуда Акпаровна, экономика ғылымдарының кандидаты, аға оқытушы, Энергетика институты, «С. Сейфуллин атындағы Қазақ агротехникалық зерттеу университеті» КЕАҚ, Астана қ., 010000,

Қазақстан Республикасы, e-mail: murassayahat@mail.ru, <https://orcid.org/0009-0006-7090-869X>

Машрапова Ризагуль Мегданиятовна, PhD докторы, постдокторант, Энергетика факультеті, Торайғыров университеті, Павлодар қ., 140008, Қазақстан Республикасы, e-mail: rizka1504@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0001-9509-5767>

Меирбекова Оксана Даировна, аға оқытушы, Қожа Ахмет Ясауи атындағы Халықаралық қазақ-түрік университеті, Түркістан қ., 161200, Қазақстан Республикасы, e-mail: oksana_120183@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0003-0949-1443>

Мерғалимова Алмагуль Кайырбергеновна, PhD докторы, қауымд. профессор, Энергетика институты, «С. Сейфуллин атындағы Қазақ агротехникалық зерттеу университеті» КЕАҚ, Астана қ., 010000, Қазақстан Республикасы, e-mail: almagul_mergalimova@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0002-5990-8182>

Мехтиев Али Джаванширович, техника ғылымдарының кандидаты, қауымд. профессор, Әбілқас Сағынов атындағы Қарағанды техникалық университеті кеңес мүшесі, ғылыми жұмыстар жөніндегі проректоры, Қарағанды қ., 100008, Қазақстан Республикасы, e-mail: barton.kz@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0002-2633-3976>

Мешерякова Татьяна Юрьевна, техника ғылымдарының кандидаты, доцент, Сәтбаев университет, Алматы қ., 050013, Қазақстан Республикасы, e-mail: meshherjakova_tanja@rambler.ru, <https://orcid.org/0000-0003-1910-8487>

Минажова Саулеш Аманбаевна, PhD, ғылыми қызметкер, «QazNRG Group» ЖШС, Алматы қ., 050060, Қазақстан Республикасы, e-mail: s.minazhova@satbayev.university, <https://orcid.org/0000-0002-5461-2251>

Молдашева Гүлназ Маратқызы, физика-техникалық факультетінің магистранты, Әл-Фараби атындағы Қазақ Ұлттық Университеті, Алматы қ., 050040, Қазақстан Республикасы, e-mail: gulnaz.moldasheva.02@mail.ru, <https://orcid.org/0009-0005-4232-733X>

Мынбаева Зауреш Таласбековна, техника ғылымдарының магистрі, «Энергетика» білім беру бағдарламасының аға оқытушысы, Қазақ ұлттық су шаруашылығы және ирригация университеті, Тараз қ., 080013, Қазақстан Республикасы, e-mail: zauresh2610@gmail.com, <https://orcid.org/0009-0005-9853-7723>

Налибаев Нургали Жаксылыкович, техника ғылымдарының магистрі, «Энергетика» білім беру бағдарламасының аға оқытушысы, Қазақ ұлттық су шаруашылығы және ирригация университеті, Тараз қ., 080013,

Қазақстан Республикасы, e-mail: Nurgali20091978@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0002-5285-541X>

Нешина Елена Геннадьевна, техника ғылымдарының кандидаты, қауымд. профессор (доцент), «Энергетикалық жүйелер» кафедрасының меңгерушісі, Әбілқас Сағынов атындағы Қарағанды техникалық университеті, Қарағанды қ., 100026, Қазақстан Республикасы, e-mail: neg@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0002-8973-2958>

Нияз Мухаммад, «Химия» кафедрасының профессоры, Университет Абдул Вали Хана, Мардан қ., 45320, Пәкістан Ислам Республикасы, e-mail: drniaz@awakum.edu.pk, <https://orcid.org/0000-0001-8431-192X>

Ниязбаев Адилхан Кизатоллинович, қауымд. профессор, «Аграрлық техника және машина жасау», каф. Меңгерушісі, Қазақ ұлттық аграрлық зерттеу университеті, Алматы қ., 050063/A10E4X7, Қазақстан Республикасы, e-mail: adil77@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0001-6753-5489>

Новожилов Александр Николаевич, техника ғылымдарының докторы, профессор, «Электр энергетикасы» кафедрасы, Торайғыров университеті, Павлодар қ., 140008, Қазақстан Республикасы, e-mail: novozhilova_on@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0001-7530-5034>

Новожилов Тимофей Александрович, техника ғылымдарының кандидаты, «Өнеркәсіптік кәсіпорындарды электрмен жабдықтау» кафедрасының доценті, Омбы мемлекеттік техникалық университеті, Омбы қ., 644050, Ресей Федерациясы, e-mail: timokvey@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0003-0293-7852>

Нурмағанбетова Гулим Сахитовна, PhD, м.а. қауымд. профессор, электрмен жабдықтау кафедрасы, С. Сейфуллин атындағы Қазақ агротехникалық зерттеу университеті, Астана қ., 010000, Қазақстан Республикасы, e-mail: sahitovna@gmail.com, <https://orcid.org/0000-0002-9529-2477>

Нүсіпали Аяулым, 7M06201 - «Телекоммуникация» мамандығы бойынша магистрант, Автоматика және ақпараттық технологиялар институты, «Қ. И. Сәтбаев атындағы Қазақ Ұлттық Техникалық Зерттеу университеті» КЕАҚ, Алматы қ., 050013, Қазақстан Республикасы, e-mail: ayaulym.nussipali@kcell.kz, <https://orcid.org/0009-0009-2452-3387>

Олейник Сергей Иванович, техника ғылымдарының кандидаты, директоры «ЭНЭКО» ЖШС, Павлодар қ., 140002, Қазақстан Республикасы, e-mail: olejnik_pte@mail.ru, <https://orcid.org/0009-0009-8007-7166>

Олейников Сергей Владимирович, техника ғылымдарының кандидаты, қауымд. профессор, Салалық технологиялар институты, Батыс Қазақстан инновациялық-технологиялық университеті, Орал қ., 090006,

Қазақстан Республикасы, e-mail: oleinikov@mail.ru, <https://orcid.org/0009-0008-3751-9048>

Омарова Ардак Аубкировна, аға оқытушы, Л. Н. Гумилев атындағы Еуразия ұлттық университеті, Астана қ., Z01C0X0, Қазақстан Республикасы, e-mail: ardak_omarova@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0001-5663-4414>

Оржанова Жанар Керимбековна, техника ғылымдарының кандидаты, доцент, Облыстық электр желілері басқармасының электр тұтыну, талдау және мониторинг бөлімінің жетекші инженері, АО «Алатау Жарық Компаниясы», Алматы қ., 050000, Қазақстан Республикасы, e-mail: zhanar.orzhanova@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0002-5680-6674>

Петров Павел Анатольевич, PhD, доцент, Инженерлік және сандық технологиялар факультеті, «М. Қозыбаев атындағы Солтүстік Қазақстан университеті», Қазақстан Республикасы, Петропавл қ., 150000, Республика Казахстан, e-mail: paolo1988@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0001-6669-5149>

Подвалов Александр, география ғылымдарының кандидаты, «AG TECH» ЖШС директоры, Астана қ., 010009, Қазақстан Республикасы, e-mail: info@ag-tech.kz, <http://orcid.org/0009-0003-3613-0130>

Рустамов Насим Тулегенович, техника ғылымдарының докторы, аға оқытушы, Қожа Ахмет Ясауи атындағы Халықаралық қазақ-түрік университеті, Түркістан қ., 161200, Қазақстан Республикасы, e-mail: nasim52@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0002-6437-6600>

Сабырова Айгерім Ғалымжанқызы, физика-техникалық факультетінің магистранты, Әл-Фараби атындағы Қазақ Ұлттық Университеті, Алматы қ., 050040, Қазақстан Республикасы, e-mail: sabyrova_ako@mail.ru, <https://orcid.org/0009-0002-0015-8433>

Сагытаева Куралай Асетовна, аға оқытушы, Г. Даукеев атындағы Алматы энергетика және байланыс университеті, Алматы қ., 050013, Қазақстан Республикасы, Қазақстан Республикасы, e-mail: k.sagitaeva@aes.kz, <https://orcid.org/0000-0001-8464-7204>

Садвакасова Алия Пшановна, арнайы пәндер оқытушысы, Алматы қаржы-экономикалық колледжі, Алматы қ., 050042, Қазақстан Республикасы, e-mail: acp76@mail.ru, <https://orcid.org/0009-0004-3409-8680>

Садыкова Лязат Анатольевна, техника ғылымдарының кандидаты, қауымд. профессор, Салалық технологиялар институты, Батыс Қазақстан инновациялық-технологиялық университеті, Орал қ., 090006, Қазақстан Республикасы, e-mail: lazatsadykova022@gcom, <https://orcid.org/0009-0005-3786-8529>

Садық Жәдігер Орысбайұлы, Инженер, Ж. Әбішев атындағы Химия-металлургия институты, Қарағанды қ., 100009, Қазақстан Республикасы, e-mail: sadzhad03@gmail.com, <https://orcid.org/0009-0006-8557-1532>

Салтанат Алихановна Болегенова, физика-математика ғылымдарының докторы, профессор, әл-Фараби атындағы Қазақ ұлттық университеті, Алматы қ., 050040, Қазақстан Республикасы, e-mail: saltanat.bolegenova@kaznu.kz, <https://orcid.org/0000-0001-5001-7773>

Сарғужиева Бибигуль Абуевна, аға оқытушы, Салалық технологиялар институты, Батыс Қазақстан инновациялық-технологиялық университеті, Орал қ., 090006, Қазақстан Республикасы, e-mail: sarguziyevabibi@gmail.com, <https://orcid.org/0000-0003-2618-9529>

Сарсенбаев Ерлан Алиаскарович, PhD, қауымд. профессор, Қ. И. Сәтбаев атындағы Қазақ ұлттық зерттеу техникалық университеті, Алматы қ., 050000, Қазақстан Республикасы, e-mail: y.sarsenbayev@satbayev.university, <https://orcid.org/0000-0002-8887-1171>

Сафарбаков Алексей Альбертович, техника ғылымдарының кандидаты, «Павлодартехэнерго» ЖШС Директоры, Павлодар қ., 140002, Қазақстан Республикасы, e-mail: safarbakov@mail.ru, <https://orcid.org/0009-0007-4104-3225>

Сейтенова Гайни Жумағалиевна, Химия ғылымдарының кандидаты, доцент, Л. Н. Гумилев атындағы Еуразия ұлттық университеті, Астана қ., 010000, Қазақстан Республикасы, e-mail: gainiseitenova@gmail.com, <https://orcid.org/0000-0001-6202-3951>

Сергеевс Якобс, Торайғыров атындағы университеттің докторанты, Павлодар қ., 140000, Қазақстан Республикасы, e-mail: Sergeevs_yakobs@mail.ru, <https://orcid.org/0009-0009-2090-9143>

Смагулова Каршыга Канатовна, PhD доктор, «Өндірістік процесстерді автоматтандыру» кафедрасының доценті, Ә. Сағинов атындағы Қарағанды техникалық университеті, Қарағанды қ., 100027, Қазақстан Республикасы, e-mail: k.k.smagulova@ktu.edu.kz, <https://orcid.org/0000-0001-6834-8490>

Смайлов Нұржігіт, PhD докторы, қауымд. профессор, Автоматика және ақпараттық технологиялар институты, Қ. И. Сәтбаев атындағы Қазақ Ұлттық Техникалық Зерттеу университеті» КЕАҚ, Алматы қ., 050013, Қазақстан Республикасы, e-mail: n.smailov@satbayev.university, <https://orcid.org/0000-0002-7264-2390>

Сулейменова Дурия Төлеугалымовна, ғылым магистры, 6D071800 «Электрэнергетика» оқу бағдарламасы бойынша докторант, Ғұмарбек Даукев атындағы Алматы энергетика және байланыс университеті, Алматы қ.,

050000, Қазақстан Республикасы, e-mail: duriyasuleimenova@mail.ru, <https://orcid.org/0009-0005-1996-8235>

Тайсариева Кырмызы Нурлановна, PhD докторы, қауымд. профессор, Автоматика және акпараттық технологиялар институты, «Қ. И. Сәтбаев атындағы Қазақ Ұлттық Техникалық Зерттеу университеті» КЕАҚ, Алматы қ., 050013, Қазақстан Республикасы, e-mail: k.taisariyeva@satbayev.university, <https://orcid.org/0000-0002-1949-4288>

Талипов Олжас Манарбекұлы, PhD докторы (мамандығы Электрэнергетика), профессор, «Энергетика» факультетінің деканы, Торайғыров университеті, Павлодар қ., 140008, Қазақстан Республикасы, e-mail: talipov1980@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0002-8355-1769>

Тананова Дана Дастанқызы, магистр, ғылыми қызметкер, «QazNRG Group» ЖШС, Алматы қ., 050060, Қазақстан Республикасы, e-mail: tananova.dana@gmail.com, <https://orcid.org/0000-0002-1175-8525>

Ташлыкова Раиса Владимировна, «СевКазЭнергоПром» ҒӨК ЖШС бас директорының кеңесшісі, Павлодар қ., 140006, Қазақстан Республикасы, e-mail: r.tashlykova@skep.kz, <https://orcid.org/0009-0004-7285-9305>

Тлешова Акмарал Схановна, аға оқытушы, М. Х. Дулати атындағы Тараз университеті, Тараз қ., 080000, Қазақстан Республикасы, e-mail: akmaral.tleshova@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0002-4594-5265>

Тойбазар Дәулет Мейірұлы, аға оқытушы, «Электр энергетикасы» кафедрасы, Г. Даукеев атындағы Алматы энергетика және байланыс университеті, Алматы қ., Қазақстан Республикасы, Қазақ ұлттық аграрлық зерттеу университеті; кіші ғылыми қызметкер, «Энергетика және электротехника» кафедрасы, Алматы қ., 050062/A10X5Y5, Қазақстан Республикасы, e-mail: d.toibazar@aes.kz, <https://orcid.org/0009-0002-4978-4400>

Тюлюгенова Ляззат Балтабаевна, «Электр энергетикасы» мамандығы бойынша докторант Энергетика факультеті, Торайғыров университеті, Павлодар қ., 140008, Қазақстан Республикасы, e-mail: leonard7@internet.ru, <https://orcid.org/0000-0002-7632-3098>

Уахит Наурызбай Әсетұлы, «Жылуэнергетика» кафедрасының докторанты, Торайғыров университеті, Павлодар қ., 140008, Қазақстан Республикасы, e-mail: nauryzmc@gmail.com, <https://orcid.org/0000-0002-1626-2895>

Хазимов Марат Жалелович, «Энергетика және электротехника», Қазақ ұлттық аграрлық зерттеу университеті, Алматы қ., Қазақстан Республикасы; техника ғылымдарының кандидаты, профессор, «Жылуэнергетикасы және физика» кафедрасы, Г. Даукеев атындағы Алматы энергетика және байланыс

университеті, Алматы қ., 050063/A10E4B2, Қазақстан Республикасы, e-mail: mkhazimov@gmail.com, <https://orcid.org/0000-0001-5448-3122>

Шерьязов Сакен Койшыбаевич, техника ғылымының докторы, «Технологиялық процесстерді энергиямен қамтамасыз ету және автоматтандыру» кафедрасының профессоры, Оңтүстік Орал мемлекеттік аграрлық университеті, Челябин қ., 454080, Ресей Федерациясы, e-mail: sakenu@yandex.ru, <https://orcid.org/0000-0001-8795-5114>

Шукуралиев Абдорбек Шукуралі ұлы, PhD, доцент, Электротехника және энергетика факультеті, Әндіжан мемлекеттік техникалық институты, Әндіжан қ., 171100, Өзбекстан Республикасы, e-mail: abrorbekshukuraliyev7@gmail.com, <https://orcid.org/0008-0007-7589-006>

Ыбрай Сұлтан Барлымбайұлы, техника ғылымдарының магистры, аға оқытушы, Энергетика институты, «С. Сейфуллин атындағы Қазақ агротехникалық зерттеу университеті» КЕАҚ, Астана қ., 010000, Қазақстан Республикасы, e-mail: Sultanybray@gmail.com, <https://orcid.org/0000-0002-5262-2149>

Ярославцев Михаил Викторович, техника ғылымдарының кандидаты, доцент, Энергетика факультеті, Торайғыров университеті, Павлодар қ., 140008, Қазақстан Республикасы, e-mail: myaroslavtsev@yandex.ru, <https://orcid.org/0000-0002-1440-2065>

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ

Абдыбай Улан Болатбекулы, специалист, магистр, кафедра физики плазмы, нанотехнологии и компьютерной физики, физико-технический факультет, Казахский национальный университет имени Аль-Фараби, г. Алматы, 050040, Республика Казахстан, e-mail: Abdibay_ulan@mail.ru, <https://orcid.org/0009-0002-5309-5827>

Абилядаева Айман Станбековна, ст. преподаватель, Таразский университет имени М. Х. Дулати, г. Тараз, 080000, Республика Казахстан, e-mail: Abildayeva65@internet.ru, <https://orcid.org/0000-0002-3752-5607>

Аджанов Айтуган, кандидат технических наук, доцент, кафедра «Эксплуатация электрооборудования», Казахский агротехнический исследовательский университет имени С. Сейфуллина, г. Астана, 010011, Республика Казахстан, e-mail: a.adjanov@gmail.com, <https://orcid.org/0009-0008-3662-1833>

Азаматов Мурат Токтарбекович, докторант, Факультет энегетики, Торайғыров университет, г. Павлодар, 140008, Республика Казахстан, e-mail: muratazamatov@mail.ru, <https://orcid.org/0009-0007-6956-0822>

Айдымбаева Жанар Абдешевна, доктор PhD, доцент, НАО «Алматинский университет энергетики и связи имени Гумарбека Даукеева», г. Алматы, 050013, Республика Казахстан, e-mail: diararu@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0002-6908-7170>

Айтмагамбетова Маралгуль Борамбаевна, магистр технических наук, ст. преподаватель, Институт Энергетики, НАО «Казахский агротехнический исследовательский университет имени С. Сейфуллина», г. Астана, 010000, Республика Казахстан, e-mail: aiti.mb@yandex.kz, <https://orcid.org/0000-0002-7443-9708>

Айтулина Айжан Мингожановна, ст. преподаватель, Факультет инженерии и цифровых технологий Северо-Казахстанский университет имени М. Козыбаева, г. Петропавловск, 150000, Республика Казахстан, e-mail: o_aizhan@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0002-9134-3783>

Акишев Каршыга, Заведующий кафедрой «Компьютерная инженерия и автоматизация», кандидат технических наук, ассоциированный профессор (доцент), факультет Инжиниринга и информационных технологий, Казахский университет технологии и бизнеса имени К. Кулажанова, г. Астана, 010000, Республика Казахстан, e-mail: akmail04cx@mail.ru, <http://orcid.org/0000-0001-5202-3501>

Акишева Ленара, слушатель 10 класса, Назарбаев интеллектуальная школа, г. Астана, 010000, Республика Казахстан, e-mail: L.Aks@gmail.com, <http://orcid.org/0009-0008-1214-0867>

Амренова Асем Уахитовна, ст. преподаватель, кандидат физико-математических наук, кафедра физики плазмы, нанотехнологии и компьютерной физики, физико-технический факультет, Казахский национальный университет имени Аль-Фараби, г. Алматы, 050040, Республика Казахстан, e-mail: Amrenova.asem77@gmail.com, <https://orcid.org/0000-0002-6945-3644>

Ануарбеков Максат Арганатович, доктор PhD, ст. преподаватель, Институт Энергетики, НАО «Казахский агротехнический исследовательский университет имени С. Сейфуллина», г. Астана, 010000, Республика Казахстан, e-mail: anuarbekov1495@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0002-9483-7105>

Аскарова Алия Сандыбаевна, доктор физико-математических наук, профессор, Казахский Национальный университет имени аль-Фараби, г. Алматы, 050040, Республика Казахстан, e-mail: aliya.askarova@kaznu.kz, <https://orcid.org/0000-0003-1797-1463>

Аубакирова Гауля Фаритовна, ст. преподаватель, Факультет инженерии и цифровых технологий Северо-Казахстанский университет имени М. Козыбаева, г. Петропавловск, 150000, Республика Казахстан, e-mail: geli8778@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0001-8636-630X>

Аханов Азамат Рахметуллаевич, докторант, специальность «автоматизация и управление», Факультет Энергетики, Торайғыров университет, г. Павлодар, 140008, Республика Казахстан, e-mail: a_akanov@mail.ru, <https://orcid.org/0009-0003-1671-821X>

Аханов Серик Мейрамбекович, кандидат технических наук, ст. преподаватель, кафедра «Аграрная техника и технология», Кызылординский Университет имени Коркыт Ата, г. Кызылорда, N01P2T6 (120014), Республика Казахстан, e-mail: serik.ahanov@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0003-1422-2096>

Аяпберген Жансая Куанышқызы, докторант, Институт автоматики и информационных технологий, НАО Казахский национальный исследовательский технический университет имени К. И. Сатпаева, г. Алматы, 050013, Республика Казахстан, e-mail: z.ayapbergen@satbayev.university, <https://orcid.org/0009-0002-0798-7840>

Байжарикова Марина, кандидат технических наук, ассоциированный профессор, кафедра «Прикладная информатика и программирование», Таразский Региональный университет, г. Тараз, 080000, Республика Казахстан, e-mail: marina2288@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0003-1591-2697>

Байжұма Жандос Ескендірұлы, преподаватель, PhD, и.о. доцент, физико-технический факультет, Казахский национальный университет имени аль-Фараби, г. Алматы, 050040, Республика Казахстан, e-mail: zhandos.baizhuma@kaznu.kz, <https://orcid.org/0000-0003-3692-2245>

Байниязов Бахытбек Аскерович, кандидат технических наук, кафедра Электроснабжение, Казахский агротехнический исследовательский университет имени С. Сейфуллина, г. Астана, 010000, Республика Казахстан, e-mail: bainiyazov69@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0002-1103-2329>

Балходжаева Гулайым Раушанбекқызы, магистр технических наук, Инженерно-технологический институт, Кызылординский университет имени Коркыт Ата, г. Кызылорда, 020000, Республики Казахстан, e-mail: gulayim_2012@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0002-5066-1849>

Барукин Александр Сергеевич, доктор PhD, профессор, Факультет энергетики, Торайғыров университет, г. Павлодар, 140008, Республика Казахстан, e-mail: alexbarukin@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0002-5969-4030>

Бегимбетова Айнул Серикбаевна, PhD, ассоциированный профессор, Алматинский университет энергетики и связи имени Гумарбека Даукеева, г. Алматы, 050013, Республика Казахстан, e-mail: a.begimbetova@aes.kz, <https://orcid.org/0000-0001-8917-2244>

Бекжан Зулфия Багдаевна, докторант-студент, 3 курс, образовательная программа «Электроэнергетика», Казахский национальный университет имени аль-Фараби, г. Алматы, 50040, e-mail: zulfiya.bekzhan@gmail.com, <https://orcid.org/0000-0001-6018-0945>

Бекибаев Тимур Талгатович, руководитель отдела «Компьютерное моделирование и программное обеспечение», Казахский национальный исследовательский технический университет имени К. И. Сатпаева, 050013, г. Алматы, Республика Казахстан, e-mail: timur_bekibaev@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0001-7030-0015>

Беккожина Бибигул Казизовна, ст. преподаватель, Факультет инженерии и цифровых технологий, Северо-Казахстанский университет имени М. Козыбаева, г. Петропавловск, 150000 Республика Казахстан, e-mail: bekkozhibinbk@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0002-8945-8477>

Бергузин Асхат Нурланович, PhD, профессор, Торайғыров университет, г. Павлодар, 140008, Республика Казахстан, e-mail: askhat.berguzinov@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0001-6954-8259>

Боканова Алия Абылгазиевна, доктор технических наук, доцент, профессор, Евразийский технологический университет, г. Алматы, 050012, Республика Казахстан, e-mail: bokanova_a@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0002-3462-5629>

Болегенова Салтанат Алихановна, доктор физико-математических наук, профессор, Казахский Национальный Университет имени аль-Фараби, г. Алматы, 050040, Республика Казахстан, e-mail: saltanat.bolegenova@kaznu, <https://orcid.org/0000-0001-5001-7773>

Бондарцев Давид Юрьевич, PhD, профессор-преподаватель, кафедра «Теплоэнергетика и Физика», ассоциированный-профессор, НАО Алматинский Университет Энергетики и Связи имени Г. Даукеева, Институт энергетики и зеленых технологий, г. Алматы, 050013, Республика Казахстан, e-mail: d.bondartsev@aes.kz, <https://orcid.org/0000-0001-8778-7851>

Буранова Нурслу Галымовна, магистр технических наук, ст. преподаватель, институт отраслевых технологий, Западно-Казахстанский инновационно-технологический университет, г. Уральск, 090006, Республика Казахстан, e-mail: nurslu_1986@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0003-0440-5948>

Бурумбаев Азамат Галимжанович, PhD докторант, младший научный сотрудник, Карагандинский индустриальный университет, г. Темиртау, 101400, Республика Казахстан, Химико-металлургический институт имени Ж. Абишева, г. Караганда, 100009, Республика Казахстан, e-mail: a.burumbayev@ttu.edu.kz, <https://orcid.org/0000-0001-5276-2259>

Генбач Александр Алексеевич, доктор технических наук, профессор ВАК, кафедра «Теплоэнергетика и Физика», НАО Алматинский Университет Энергетики и Связи имени Г. Даукеева, Институт энергетики и зеленых технологий, г. Алматы, 050013, Республика Казахстан, e-mail: a.genbach@aes.kz, <https://orcid.org/0009-0001-3819-4387>

Генбач Анна Александровна, преподаватель, Государственное бюджетное профессиональное образовательное учреждение Московской области «Можайский техникум», 143203, , Московская область, Можайский городской округ, пос. Строитель, Российская Федерация, e-mail: anngenbach@gmail.com, <https://orcid.org/0009-0004-1255-6230>

Григоренко Ольга Викторовна, доцент, заведующая кафедрой высшей математики, Сибирский государственный университет геосистем и технологий, г. Новосибирск, 630108, Российская федерация, e-mail: ogrigorenko2311@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0001-8957-8746>

Даулетханова Алуа Муратканқызы, докторант кафедры «Энергетика», НАО Казахский национальный исследовательский технический университет имени К. И. Сатпаева (КазНITU), г. Алматы, 050013, Республика Казахстан, e-mail: a.dauletkhanova@satbayev.university, <https://orcid.org/0000-0003-3459-6167>

Дауренова Индира Маликовна, докторант, кафедра «Энергетика и электротехника», Казахский Национальный Аграрный Исследовательский

Университет, г. Алматы, Республика Казахстан, ст. преподаватель, кафедра «Электроэнергетика», Алматинский университет энергетики и связи имени Гумарбека Даукеева, г. Алматы, 050031/A10A9B4, Республика Казахстан, e-mail: indikow-88-kz@mail.ru, <https://orcid.org/0009-0001-0155-6954>

Динмуханбетова Айгуль Жумагельдыевна, доктор PhD, ассоц. профессор, Торайғыров университет, Факультет энергетики, г. Павлодар, 140008, Республика Казахстан, e-mail: ardi100909@mail.ru, <https://orcid.org/0009-0006-4538-9672>

Досаев Балтабек Имангалиевич, докторант, специальность «Теплоэнергетика», факультет Энергетики, Торайғыров университет, г. Павлодар, 140008, Республика Казахстан, e-mail: baltabek_dossaev@icloud.com, <https://orcid.org/0009-0005-0208-9912>

Драганова Маргарита Анатольевна, магистр, старший преподаватель, кафедра «Энергетические системы», НАО «Карагандинский технический университет имени Абылкаса Сагинова», г. Караганда, 100008, Республика Казахстан, e-mail: margo_anton@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0002-8973-2958>

Дуйсенбек Жансая Сериковна, PhD, ассоциированный профессор, Алматинский университет энергетики и связи имени Гумарбека Даукеева, г. Алматы, 050013, Республика Казахстан, e-mail: zhaniko.adina@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0001-7844-4240>

Дюсова Ризагуль Муслимовна, кандидат технических наук, постдокторант, Торайғыров университет, г. Павлодар, 140000, Республика Казахстан, e-mail: rizagul.dyussova@gmail.com, <https://orcid.org/0000-0003-3083-5255>

Ербаев Ербол Тулегенович, доктор PhD, доцент политехнического института, НАО «Западно-Казахстанский аграрно-технический университет имени Жангир хана», г. Уральск, 090009, Республика Казахстан, e-mail: erbol.erbaev@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0002-3186-9994>

Ергалиев Азамат Багдатович, преподаватель-ассистент кафедры «Электротехника и автоматизация», Факультет энергетики, Торайғыров университет, г. Павлодар, 140008, Республика Казахстан, e-mail: vergaliyev10@gmail.com, <https://orcid.org/0009-0001-1315-2615>

Жалмагамбетова Ултуар Каирбулатовна, PhD, профессор, кафедра «Теплоэнергетики», факультет Энергетики, г. Павлодар, 140008, Республика Казахстан, e-mail: ultuara@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0002-2261-2222>

Жанпейісова Айжан Орынбекқызы, PhD студент, Казахский национальный исследовательский технический университет имени К. И. Сатпаева (КазННТУ), г. Алматы, 050013, Республика Казахстан, e-mail: Ayghan.zhanpeisova@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0001-5040-428X>

Жапбасбаев Узак Кайрбекович, доктор технических наук, профессор, зав. научно-производственной лаборатории «Моделирование в энергетике», Казахский национальный исследовательский технический университет имени К. И. Сатпаева, г. Алматы, 050013, Республика Казахстан, e-mail: uzak.zh@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0001-5973-5149>

Жукешов Ануар Муратович, доктор физико-математических наук, профессор, кафедра физики плазмы, нанотехнологии и компьютерной физики, физико-технический факультет, Казахский национальный университет имени Аль-Фараби, г. Алматы, 050040, Республика Казахстан, e-mail: zhukeshov@physics.kz, <https://orcid.org/0000-0001-9153-323X>

Зия Ур Рехман, штатный профессор кафедры «Химия», Университет Куэйд-и-Азам, Исламабад, 45320, Исламская Республика Пакистан, e-mail: zrehman@qau.edu.pk, <https://orcid.org/0000-0002-1436-3131>

Исабеков Даурен Джамбулович, PhD, профессор, факультет энергетики, Торайғыров университет, г. Павлодар, 140008, Республика Казахстан, e-mail: Dauren_pvl2012@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0002-6673-5646>

Исабеков Жанат Бейсембайевич, PhD, ассоц. профессор (доцент), зав. кафедрой «Электротехники и Автоматизации», Факультет энергетики, Торайғыров университет, г. Павлодар, 140008, Республика Казахстан, e-mail: zh_is@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0003-3980-1617>

Исабекова Бибигуль Бейсембаевна, PhD, ассоц. профессор (доцент), Факультет Computer science, Торайғыров университет, г. Павлодар, 140008, Республика Казахстан, e-mail: asbizh@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0001-5044-3211>

Исаев Сағи, магистр естественных наук, ст. преподаватель, Прикладная информатика и программирование, Таразский Региональный университет, 080000, г. Тараз, Республика Казахстан, e-mail: sagiissayev.1993kz@gmail.com, <https://orcid.org/0009-0008-0988-0952>

Калтаев Абдулла Габдылманапулы, PhD, ассоц. профессор (доцент), Торайғыров университет, г. Павлодар, 140008, Республика Казахстан, e-mail: abdulla911@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0003-1684-3347>

Камарова Сауле Нуртазаевна, PhD, доцент кафедры Энергетика, Карагандинский индустриальный университет, г. Темиртау, Карагандинская область, 101400, Республика Казахстан, e-mail: cfekt.rfvfhjdf@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0001-8464-7204>

Кинжибекова Акмарал Кабиденовна, профессор, факультет энергетики, Торайғыров университет, г. Павлодар, 140008, Республика Казахстан, e-mail: akmaral70@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0001-5839-3001>

Кисманова Айгерим, кандидат технических наук, доцент, кафедра «Эксплуатация электрооборудования», Казахский агротехнический исследовательский университет имени С. Сейфуллина, г. Астана, 010011, Республика Казахстан, e-mail: Kismanova08@mail.ru, <https://orcid.org/0009-0000-6150-0517>

Койшиев Темирхан Косыбаевич, доктор технических наук, профессор, кафедра физики плазмы, нанотехнологии и компьютерной физики, Физико-технический факультет, Казахский национальный университет имени аль-Фараби, г. Алматы, 50040, Республики Казахстан, e-mail: Temirkhan.Koishiyev@kaznu.edu.kz, <https://orcid.org/0000-0002-5320-6243>

Куандык Торебек, PhD докторант, Образовательная программа «Управление техническими системами (8D07107)», энергетический факультет, Казахский агротехнический университет имени С. Сейфуллина, г. Астана, 010011, Республика Казахстан, e-mail: kuandyktorebek@gmail.com, <https://orcid.org/0009-0001-3198-9806>

Куатова Анар Сталовна, докторант, кафедра Электроснабжение, Казахский агротехнический исследовательский университет имени С. Сейфуллина, г. Астана, 010000, Республика Казахстан, e-mail: anarkuatoeva2019@gmail.com, <https://orcid.org/0000-0001-8972-1346>

Каласов Нұрдаулет Болатұлы, преподаватель, PhD, и.о доцент, физико-технический факультет, Казахский национальный университет имени аль-Фараби, г. Алматы, 050040, Республика Казахстан e-mail: kalasov.nurdaulet@gmail.com, <https://orcid.org/0000-0003-3709-5544>

Қожагелді Болат Жарылқапұлы, кандидат технических наук, ассоц. профессор (доцент).Руководитель образовательной программы «Энергетика» Казахского национального университета водного хозяйства и ирригации.г.Тараз .080013 Республика Казахстан. e-mail: bolat.kozhageldi@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0001-9697-6312>

Ларкин Виктор Александрович, заместитель генерального директора по производству ТОО НПФ «СевКазЭнергоПром», г. Павлодар, 140006, Республика Казахстан, e-mail: v.larkin@skep.kz, <https://orcid.org/0009-0008-2079-3358>

Максимов Валерий Юрьевич, PhD, профессор, Казахский Национальный Университет имени аль-Фараби, г. Алматы, 050040, Республика Казахстан, e-mail: valeriy.maximov@kaznu.kz, <https://orcid.org/0000-0003-4120-1071>

Махамбетов Ерболат Нысаналыұлы, PhD, ассоц. профессор, Химико-металлургический институт имени Ж. Абишева, г. Караганда, 100009,

Республика Казахстан, e-mail: m.ye.n@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0001-8613-9932>

Маханова Махмуда Акпаровна, кандидат экономических наук, ст. преподаватель, Институт Энергетики, НАО «Казахский агротехнический исследовательский университет имени С. Сейфуллина», г. Астана, 010000, Республика Казахстан, e-mail: murassayahat@mail.ru, <https://orcid.org/0009-0006-7090-869X>

Машрапова Ризагуль Мегданиятовна, доктор PhD, постдокторант, Факультет энергетике, Торайғыров университет, Павлодар, 140008, Республика Казахстан, e-mail: rizka1504@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0001-9509-5767>

Меирбекова Оксана Даировна, ст. преподаватель, Международный казахско-турецкий университет имени Хожды Ахмеда Ясави, г. Туркестан, 161200, Республика Казахстан, e-mail: oksana_120183@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0003-0949-1443>

Мерғалимова Алмагуль Кайырбергеновна, доктор PhD, ассоц. профессор, Институт Энергетики, НАО «Казахский агротехнический исследовательский университет имени С. Сейфуллина», г. Астана, 010000, Республика Казахстан, e-mail: almagul_mergalimova@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0002-5990-8182>

Мехтиев Али Джаванширович, кандидат технических наук, ассоц. профессор, Член-Правления проректор по научной работе, Карагандиский технический университет имени Абылкаса Сагинова, г. Караганда, 100008, Республика Казахстан, e-mail: barton.kz@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0002-2633-3976>

Мешерякова Татьяна Юрьевна, кандидат технических наук, доцент, Сатпаев университет, г. Алматы, 050013, Республика Казахстан, e-mail: meshherjakova_tanja@rambler.ru, <https://orcid.org/0000-0003-1910-8487>

Минажова Саулеш Аманбаевна, PhD, научный сотрудник, ТОО «QazNRG Group», г. Алматы, 050060, Республика Казахстан, e-mail: s.minazhova@satbayev.university, <https://orcid.org/0000-0002-5461-2251>

Молдашева Гүлназ Маратқызы, магистрант, физико-технический факультет, Казахский национальный университет имени аль-Фараби, г. Алматы, 050040, Республика Казахстан, e-mail: gulnaz.moldasheva.02@mail.ru, <https://orcid.org/0009-0005-4232-733X>

Мынбаева Зауреш Таласбековна, магистр технических наук, ст. преподаватель образовательной программы «Энергетика», Казахский национальный университет водного хозяйства и ирригации, г. Тараз, 080013,

Республика Казахстан. e-mail: zauresh2610@gmail.com, <https://orcid.org/0009-0005-9853-7723>

Налибаев Нурғали Жаксылыкович, магистр технических наук, ст. преподаватель образовательной программы «Энергетика», Казахский национальный университет водного хозяйства и ирригации, г. Тараз. 080013, Республика Казахстан, e-mail: Nurgali20091978@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0002-5285-541X>

Нешина Елена Геннадьевна, кандидат технических наук, ассоц. профессор, Заведующая кафедрой «Энергетические системы», НАО «Карагандинский технический университет имени Абылкаса Сагинова», Караганда, 100026, Республика Казахстан, e-mail: 1_neg@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0002-8973-2958>

Нияз Мухаммад, штатный профессор кафедры «Химия», Университет Абдул Вали Хана, г. Мардан, 45320, Исламская Республика Пакистан, e-mail: drniaz@awkum.edu.pk, <https://orcid.org/0000-0001-8431-192X>

Ниязбаев Адилхан Кизатоллинович, ассоциированный профессор, Заведующий кафедрой «Аграрная техника и машиностроение», Казахский Национальный Аграрный Исследовательский Университет, г. Алматы, 050063/А10Е4Х7, Республика Казахстан, e-mail: adil77@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0001-6753-5489>

Новожилов Александр Николаевич, доктор технических наук, профессор, кафедра «Электроэнергетика», Торайғыров университет, г. Павлодар, 140008, Республика Казахстан, e-mail: novozhilova_on@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0001-7530-5034>

Новожилов Тимофей Александрович, кандидат технических наук, доцент, кафедра «Электроснабжение промышленных предприятий», Омский государственный технический университет, г. Омск, 644050, Российская Федерация, e-mail: timokvey@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0003-0293-7852>

Нурмаганбетова Гулим Сахитовна, PhD, и.о. ассоц. профессор, кафедра Электроснабжение, Казахский агротехнический исследовательский университет имени С. Сейфуллина, г. Астана, 010000, Республика Казахстан, e-mail: sahitovna@gmail.com, <https://orcid.org/0000-0002-9529-2477>

Нүсіпали Аяулым, магистрант, специальность 7М06201 - «Телекоммуникация», Института автоматизации и информационных технологий, НАО Казахский национальный исследовательский технический университет имени К. И. Сатпаева, Алматы, 050013, Республика Казахстан, e-mail: ayaulym.nussipali@kcell.kz, <https://orcid.org/0009-0009-2452-3387>

Олейник Сергей Иванович, кандидат технических наук, Директор ТОО «ЭНЭКО», г. Павлодар, 140002, Республика Казахстан, e-mail: olejnik_pte@mail.ru, <https://orcid.org/0009-0009-8007-7166>

Олейников Сергей Владимирович, кандидат технических наук, ассоц. профессор, институт отраслевых технологий, Западно-Казахстанский инновационно-технологический университет, г. Уральск. 090006, Республика Казахстан, e-mail: oleinikov@mail.ru, <https://orcid.org/0009-0008-3751-9048>

Омарова Ардак Аубкировна, ст. преподаватель, Евразийский национальный университет имени Л. Н. Гумилева, г. Астана, Z01C0X0, Республика Казахстан, e-mail: ardak_omarova@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0001-5663-4414>

Оржанова Жанар Керимбековна, кандидат технических наук, доцент, ведущий инженер отдела анализа и мониторинга электропотребления Управления электрических сетей области, АО «Алатау Жарык Компаниясы», г. Алматы, 050000, Республика Казахстан, e-mail: zhanar.orzhanova@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0002-5680-6674>

Петров Павел Анатольевич, PhD, доцент, Факультет инженерии и цифровых технологий, Северо-Казахстанский университет имени М. Козыбаева, г. Петропавловск, 150000, Республика Казахстан, e-mail: paolo1988@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0001-6669-5149>

Подвалов Александр, кандидат географических наук, директор ТОО «AG TECH», 010009, г. Астана, Республика Казахстан, e-mail: info@ag-tech.kz, <http://orcid.org/0009-0003-3613-0130>

Рустамов Насим Тулегенович, доктор технических наук, ст. преподаватель, Международный казахско-турецкий университет имени Хожди Ахмеда Ясави, г. Туркестан, 161200, Республика Казахстан, e-mail: nasim52@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0002-6437-6600>

Сабырова Айгерім Ғалымжанқызы, магистрант, физико-технический факультет, Казахский национальный университет имени аль-Фараби, г. Алматы, 050040, Республика Казахстан e-mail: sabyrova_ako@mail.ru, <https://orcid.org/0009-0002-0015-8433>

Сагытаева Куралай Асетовна, ст. преподаватель, Алматинский университет энергетики и связи имени Гумарбека Даукеева, г. Алматы, 050013, Республика Казахстан, e-mail: k.sagitaeva@aes.kz, <https://orcid.org/0000-0001-8464-7204>

Садвакасова Алия Пшановна, преподаватель специальных дисциплин, Алматинский финансово-экономический колледж, г. Алматы, 050042, Республика Казахстан, e-mail: acp76@mail.ru, <https://orcid.org/0009-0004-3409-8680>

Садыкова Лязат Анатольевна, кандидат технических наук, ассоц. профессор, институт отраслевых технологий, Западно-Казахстанский инновационно-технологический университет, г. Уральск, 090006, Республика Казахстан, e-mail: lazatsadykova022@gcom, <https://orcid.org/0009-0005-3786-8529>

Садық Жәдігер Орысбайұлы, инженер, Химико-металлургический институт имени Ж. Абишева, г. Караганда, 100009, Республика Казахстан, e-mail: sadzhad03@gmail.com, <https://orcid.org/0009-0006-8557-1532>

Салимов Ернар Ерланұлы, специалист, магистр, кафедра физики плазмы, нанотехнологии и компьютерной физики, физико-технический факультет, Казахский национальный университет имени Аль-Фараби, г. Алматы, 050040, Республика Казахстан, e-mail: Ernar1996@gmail.com, <https://orcid.org/0009-0005-7712-6263>

Сарғузиева Бибигуль Абуевна, ст. преподаватель, институт отраслевых технологий, Западно-Казахстанский инновационно-технологический университет, г. Уральск. 090006, Республика Казахстан, e-mail: sarguziyevabibi@gmail.com, <https://orcid.org/0000-0003-2618-9529>

Сарсенбаев Ерлан Алиаскарович, PhD, ассоц. профессор, Казахский национальный исследовательский технический университет имени К. И. Сатпаева, г. Алматы, 050000, Республика Казахстан, e-mail: y.sarsenbayev@satbayev.university, <https://orcid.org/0000-0002-8887-1171>

Сафарбаков Алексей Альбертович, кандидат технических наук, Директор ТОО «Павлодартехэнерго», г. Павлодар, Республика Казахстан, <https://orcid.org/0009-0007-4104-3225>

Сейтенова Гайни Жумагалиевна, кандидат химических наук, ассоц. профессор, Евразийский национальный университет имени Л. Н. Гумилева, г. Астана, 010000, Республика Казахстан, e-mail: gainiseitenova@gmail.com, <https://orcid.org/0000-0001-6202-3951>

Сергеев Якобс, докторант, Торайғыров университет, г. Павлодар, 140000, Республика Казахстан, e-mail: Sergeevs_yakobs@mail.ru, <https://orcid.org/0009-0009-2090-9143>

Смагулова Каршыга Канатовна, доктор PhD, доцент кафедры «Автоматизация производственных процессов», Карагандинский технический университет имени А. Сагинова, г. Караганда, 100027, Республика Казахстан, e-mail: k.k.smagulova@ktu.edu.kz, <https://orcid.org/0000-0001-6834-8490>

Смайлов Нұржігіт, доктор PhD, ассоц. профессор, Института автоматики и информационных технологий, НАО Казахский национальный

исследовательский технический университет имени К. И. Сатпаева, г. Алматы, 050013, Республика Казахстан, e-mail: n.smailov@satbayev.university, <https://orcid.org/0000-0002-7264-2390>

Сүлейменова Дурія Толеугалымовна, магистр наук, докторант, образовательная программа 6D071800 «Электроэнергетика», Алматинский университет энергетики и связи имени Гумарбека Даукеева, г. Алматы, 050000, Республика Казахстан, e-mail: duriyasuleimenova@mail.ru, <https://orcid.org/0009-0005-1996-8235>

Тайсариева Кырмызы Нурлановна, доктор PhD, ассоц. профессор, Института автоматики и информационных технологий, НАО Казахский национальный исследовательский технический университет имени К. И. Сатпаева, Алматы, 050013, Республика Казахстан, e-mail: k.taisariyeva@satbayev.university, <https://orcid.org/0000-0002-1949-4288>

Талипов Олжас Манарбекович, доктор PhD (специальность Электроэнергетика), профессор, декан факультета «Энергетики», Торайғыров университет, г. Павлодар, 140008, Республика Казахстан, e-mail: talipov1980@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0002-8355-1769>

Тананова Дана Дастановна, магистр, научный сотрудник, ТОО «QazNRG Group», г. Алматы, 050060, Республика Казахстан, e-mail: tananova.dana@gmail.com, <https://orcid.org/0000-0002-1175-8525>

Ташлыкова Раиса Владимировна, советник генерального директора ТОО НПФ «СевКазЭнергоПром», г. Павлодар, 140006, Республика Казахстан, e-mail: r.tashlykova@skep.kz, <https://orcid.org/0009-0004-7285-9305>

Тлешова Акмарал Схановна, ст. преподаватель, Таразский университет имени М. Х. Дулати, г. Тараз 080000, Республика Казахстан, e-mail: akmaral.tleshova@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0002-4594-5265>

Тойбазар Дәулет Мейірұлы, ст. преподаватель, кафедра «Электроэнергетика», Алматинский университет энергетики и связи имени Гумарбека Даукеева, г. Алматы, Республика Казахстан, младший научный сотрудник, кафедра «Энергетика и электротехника», Казахский Национальный Аграрный Исследовательский Университет, г. Алматы, 050062/А10Х5У5, Республика Казахстан, e-mail: d.toibazar@aes.kz, <https://orcid.org/0009-0002-4978-4400>

Токтаров Димаш Дауренұлы, докторант специальности «Теплоэнергетика», Казахский Национальный Университет имени аль-Фараби, г. Алматы, 050040, Республика Казахстан, e-mail: toktarow@gmail.com, <https://orcid.org/0009-0005-9557-9012>

Турбекова Арысгуль, кандидат сельскохозяйственных наук, доцент, кафедра «Сельское и растениеводство», Казахский агротехнический

исследовательский университет имени С. Сейфуллина, г. Астана, 010011, Республика Казахстан, e-mail: arysgul.turbekova.67@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0002-9689-4509>

Тюлюгенова Ляззат Балтабаевна, докторант, специальность «Электроэнергетика», Факультет энергетики, Торайғыров университет, г. Павлодар, 140008, Республика Казахстан, e-mail: leonard7@internet.ru, <https://orcid.org/0000-0002-7632-3098>

Уахит Наурызбай Әсетұлы, докторант, кафедра Теплоэнергетика, Торайғыров университет, г. Павлодар, 140008, Республика Казахстан, e-mail: nauryzmc@gmail.com, <https://orcid.org/0000-0002-1626-2895>

Хазимов Марат Жалелович, кандидат технических наук, кафедра «Энергетика и электротехника», Казахский Национальный Аграрный Исследовательский Университет, г. Алматы, Республика Казахстан, профессор, кафедра «Теплоэнергетики и физика», Алматинский университет энергетики и связи имени Гумарбека Даукеева, г. Алматы, 050063/A10E4B2, Республика Казахстан, e-mail: mkhazimov@gmail.com, <https://orcid.org/0000-0001-5448-3122>

Шерязов Сакен Койшыбаевич, доктор технических наук, профессор, кафедра «Энергообеспечение и автоматизация технологических процессов», Южно-Уральский государственный аграрный университет, г. Челябинск, 454080, Российская Федерация, e-mail: sakenu@yandex.ru, <https://orcid.org/0000-0001-8795-5114>

Шукुरалиев Аброрбек Шукुरалиевич, PhD, доцент, факультет Электротехники и энергетики, Андижанский государственный технический институт, г. Андижан, 171100, Республика Узбекистан, e-mail: abrorbekshukuraliyev7@gmail.com, <https://orcid.org/0008-0007-7589-0006>

Ыбрай Султан Барлымбаевич, магистр технических наук, ст. преподаватель, Институт Энергетики, НАО «Казахский агротехнический исследовательский университет имени С. Сейфуллина», г. Астана, 010000, Республика Казахстан, e-mail: Sultanybray@gmail.com, <https://orcid.org/0000-0002-5262-2149>

Ярославцев Михаил Викторович, кандидат технических наук, доцент, Факультет энергетика, Торайғыров университет, г. Павлодар, 140008, Республика Казахстан, e-mail: myaroslavtsev@yandex.ru, <https://orcid.org/0000-0002-1440-2065>

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Abdybay Ulan Bolatbekuly, Expert, master, Department of Plasma Physics, Faculty of Physics and Technology, Al-Farabi Kazakh National University, Almaty, 050040, Republic of Kazakhstan, e-mail: Abdibay_ulan@mail.ru, <https://orcid.org/0009-0002-5309-5827>

Abildqayeva Aiman Stanbekovna, senior lecturer, Taraz University named after M. H. Dulati, Taraz, 080000, Republic of Kazakhstan, e-mail: Abildqayeva65@internet.ru, <https://orcid.org/0000-0002-3752-5607>

Adzhanov Aitugan, Candidate of Technical Sciences, Associate Professor, Department of Electrical Equipment Operation, S. Seifullin Kazakh Agrotechnical Research University, Astana, 010011, Republic of Kazakhstan, e-mail: a.adjanov@gmail.com, <https://orcid.org/0009-0008-3662-1833>

Aidymbayeva Zhanar Abdeshevna, Doctor PhD, Associate Professor, «Almaty University of Power Engineering and Telecommunications named after Gumarbek Daukeyev» NCJSC, Almaty, 050013, Republic of Kazakhstan, e-mail: diararu@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0002-6908-7170>

Aitmagambetova Maralgul, Master of Technical Sciences, Senior Lecturer, Institute of Energy, «Kazakh Agrotechnical Research University named after S. Seifullin» NCJSC, Astana, 010000, Republic of Kazakhstan, e-mail: aiti.mb@yandex.kz, <https://orcid.org/0000-0002-7443-9708>

Akhanov Azamat Rakhmetullaevich, Doctoral student in the specialty Automation and Control, Faculty of Energy, Toraighyrov University, Pavlodar, 140008, Republic of Kazakhstan, e-mail: a_akhanov@mail.ru, <https://orcid.org/0009-0003-1671-821X>

Akhanov Serik, Candidate of technical sciences, Senior Lecturer, Kyzylorda University named after Korkyt Ata, Agricultural engineering and technology, Kyzylorda, N01P2T6 (120014), Republic of Kazakhstan, e-mail: serik.ahanov@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0003-1422-2096>

Akishev Karshyga, candidate of Technical Sciences, Head of the Department of Computer Engineering and Automation, ass.professor, Kazakh University of Technology and Business named after K. Kulazhanov, Faculty of Technology Astana, 010000, Republic of Kazakhstan, e-mail: akmail04cx@mail.ru, <http://orcid.org/0000-0001-5202-3501>

Akisheva Lenara, 10th grade student, Nazarbayev Intellectual School, Astana, 010000, Republic of Kazakhstan e-mail: L.Aks@gmail.com, <http://orcid.org/0009-0008-1214-0867>

Amrenova Asem Uakhitovna, Senior Lecturer, candidate of Sciences in Physics and Mathematics, Department of Plasma Physics, Faculty of Physics and

Technology, Al-Farabi Kazakh National University, Almaty, 050040, Republic of Kazakhstan, e-mail: Amrenova.asem77@gmail.com, <https://orcid.org/0000-0002-6945-3644>

Anuarbekov Maxat, PhD, Senior Lecturer, Institute of Energy, «Kazakh Agrotechnical Research University named after S. Seifullin» NCJSC, Astana, 010000, Republic of Kazakhstan, e-mail: anuarbekov1495@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0002-9483-7105>

Askarova Aliya Sandybaevna, Doctor of Physical and Mathematical Sciences, Professor, Al-Farabi Kazakh National University, Almaty, 050040, Republic of Kazakhstan, e-mail: aliya.askarova@kaznu.kz, <https://orcid.org/0000-0003-1797-1463>

Aubakirova Gailya, senior lector, Faculty of engineering and digital technology, «M. Kozybayev, North Kazakhstan university», Petropavlovsk, 150000, Republic of Kazakhstan, e-mail: geli8778@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0001-8636-630X>

Ayapbergen Zhansaya Kuanyshkyzy, Doctoral student, Kazakh National Research Technical University named after K. I. Satbayev, Institute of Automation and Information Technologies, Almaty, Republic of Kazakhstan, 050013, e-mail: z.ayapbergen@satbayev.university, <https://orcid.org/0009-0002-0798-7840>

Aytulina Aizhan, senior lector, Faculty of engineering and digital technology, «M. Kozybayev, North Kazakhstan university», Petropavlovsk, 150000, Republic of Kazakhstan, e-mail: o_aizhan@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0002-9134-3783>

Azamatov Murat Toktarbekovich, doctoral student in «automation and management», Faculty of Energy, Toraighyrov University, Pavlodar, 140008, Republic of Kazakhstan, e-mail: muratazamatov@mail.ru, <https://orcid.org/0009-0007-6956-0822>

Bainiyazov Bakhytbek Askerovich, Candidate of Technical Sciences, Department of Power Supply, Kazakh Agrotechnical Research University named after S. Seifullin, Astana, 010000, Republic of Kazakhstan, e-mail: bainiyazov69@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0002-1103-2329>

Baizharikova Marina, candidate of Technical Sciences, Associate Professor, Department of Applied Informatics and Programming, Taraz Regional University, Taraz, 080000, Republic of Kazakhstan, e-mail: marina2288@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0003-1591-2697>

Baizhuma Zhandos Iskendiroyevich, PhD, a.a professor, Lecturer at the Faculty of Physics and Technology, Al-Farabi Kazakh National University, Almaty, 050040, Republic of Kazakhstan, e-mail: zhandos.baizhuma@kaznu.kz, <https://orcid.org/0000-0003-3692-2245>

Balkodzhaeva Gulaiym Raushanbekkyzy, Master of Technical Sciences, Institute of Engineering and technology, Korkyt Ata Kyzylorda University, Kyzylorda, 020000, Republic of Kazakhstan, e-mail: gulayim_2012@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0002-5066-1849>

Barukin Aleksandr Sergeevich, doctor PhD, professor, Toraighyrov University, Faculty of Energy, Pavlodar, 140008, Republic of Kazakhstan, e-mail: alexbarukin@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0002-5969-4030>

Begimbetova Ainur Serikbaevna, PhD, associate professor, Almaty University of Power Engineering and Telecommunications named after Gumarbek Daukeyev, Almaty, 050013, Republic of Kazakhstan, e-mail: a.begimbetova@aes.kz, <https://orcid.org/0000-0001-8917-2244>

Bekibayev Timur Talgatovich, Master, Head of the Computer Modeling and Software Department, Satbayev University, Almaty, 050013, Republic of Kazakhstan, e-mail: timur_bekibaev@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0001-7030-0015>

Bekkozhiba Bibigul, senior lector, Faculty of engineering and digital technology, «M. Kozybayev, North Kazakhstan university», Petropavlovsk, 150000, Republic of Kazakhstan, e-mail: bekkozhibinabk@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0002-8945-8477>

Bekzhan Zulfiya, Doctoral student of the 3rd year of the educational program «Electric Power Engineering», Al-Farabi Kazakh National University, Almaty, 50040, Republic of Kazakhstan, e-mail: zulfiya.bekzhan@gmail.com, <https://orcid.org/0000-0001-6018-0945>

Berguzinov Askhat Nurlanovich, PhD, Professor, Toraighyrov University, Pavlodar, 140008, Republic of Kazakhstan, e-mail: askhat_berguzinov@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0001-6954-8259>

Bokanova Aliya Abylgazievna, Higher doctorate technical sciences, associate professor, Eurasian Technological University, Almaty, 050012, Republic of Kazakhstan, e-mail: bokanova_a@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0002-3462-5629>

Bolat Kozhageldi, Candidate of Technical Sciences, Associate Professor, Head of the Educational Program «Energy» at the Kazakh National University of Water Management and Irrigation, Taraz, 080013, Republic of Kazakhstan, e-mail: bolat.kozhageldi@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0001-9697-6312>

Bolegenova Saltanat Alikhanovna, Doctor of Physical and Mathematical Sciences, Professor, Al-Farabi Kazakh National University, Almaty, 050040, Republic of Kazakhstan, e-mail: saltanat.bolegenova@kaznu.kz, <https://orcid.org/0000-0001-5001-7773>

Bondartsev David, PhD, Associate Professor, Professor-Lecturer of the Department of Thermal Power Engineering and Physics, Almaty University of

Power Engineering and Telecommunications, named after G. Daukeev, Institute of Energy and Green Technologies, Almaty, 050013, Republic of Kazakhstan, e-mail: d.bondartsev@aes.kz, <https://orcid.org/0000-0001-8778-7851>

Buranova Nurclu, Master of Technical Sciences, Senior Lecturer, Institute of Industrial Technologies, West Kazakhstan University of Innovation and Technology, Uralsk, 090006, Republic of Kazakhstan, e-mail: nurslu_1986@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0003-0440-5948>

Burumbayev Azamat Galymzhanovich, PhD doctoral student, Karaganda Industrial University, Temirtau, 101400, Republic of Kazakhstan, Junior Researcher, Chemical-metallurgical institute named after Zh. Abishev, Karaganda, 100009, Republic of Kazakhstan, e-mail: a.burumbayev@ttu.edu.kz, <https://orcid.org/0000-0001-5276-2259>

Dauletkhanova Alua, Doctoral student of the Power Engineering Department, Non-profit Joint Stock Company «Kazakh National Research Technical University named after K. I. Satbayev», Almaty, 050013, Republic of Kazakhstan, e-mail: a.dauletkhanova@satbayev.university, <https://orcid.org/0000-0003-3459-6167>

Daurenova Indira, senior lecturer, Department of «Electric Power Engineering», Kazakh National Agrarian Research University, Almaty, Republic of Kazakhstan, Department, Energy and Electrical Engineering, doctoral student. Almaty University of Power Engineering and Telecommunications named after Gumarbek Daukeyev, Almaty, 050031/A10A9B4, Republic of Kazakhstan, e-mail: indikow-88-kz@mail.ru, <https://orcid.org/0009-0001-0155-6954>

Dinmukhanbetova Aïgul' Zhumagel'dyevna, doctor PhD, assoc. professor, Faculty of Energy, Toraighyrov University, Pavlodar, 140008, Republic of Kazakhstan, e-mail: ardi100909@mail.ru, <https://orcid.org/0009-0006-4538-9672>

Dossayev Baltabek Imangalievich, Doctoral student in «Heat and Power engineering», faculty of Energy, Toraighyrov university, Pavlodar, 140008, Republic of Kazakhstan, e-mail: baltabek_dossaev@icloud.com, <https://orcid.org/0009-0005-0208-9912>

Draganova Margarita, Senior Lecturer of the Department of Energy Systems, Master's degree, NCJSC Karaganda technical university named A. Sagynov, Karaganda, 100008, Republic of Kazakhstan, e-mail: margo_anton@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0002-8973-2958>

Duissenbek Zhansaya Serikovna, PhD, associate professor, Almaty University of Power Engineering and Telecommunications named after Gumarbek Daukeyev, Almaty, 050013, Republic of Kazakhstan, e-mail: zhaniko.adina@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0001-7844-4240>

Dyussova Rizagul, Candidate of Technical Sciences, Postdoctoral Researcher at Toraighyrov University, Pavlodar, 140000, Republic of Kazakhstan, e-mail: rizagul.dyussova@gmail.com, <https://orcid.org/0000-0003-3083-5255>

Genbach Alexander, Doctor of technical sciences, Professor of the Department of Thermal Power Engineering and Physics, Almaty University of Power Engineering and Telecommunications, named after G. Daukeev, Institute of Energy and Green Technologies, Almaty, 050013, Republic of Kazakhstan, e-mail: a.genbach@aes.kz, <https://orcid.org/0009-0001-3819-4387>

Genbach Anna, teacher, State Budgetary Vocational Educational Institution of the Moscow Region Mozhaisk Technical College, Moscow Region, Mozhaisk Urban District, 143203, Russian Federation, e-mail: anngenchach@gmail.com, <https://orcid.org/0009-0004-1255-6230>

Grigorenko Olga, Associate Professor, Head of the Department of Higher Mathematics, Siberian State University of Geosystems and Technologies, Novosibirsk, 630108, Russian Federation, e-mail: ogrigorenko2311@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0001-8957-8746>

Isaev Sagi, Master of Natural Sciences, Senior Lecturer, Department of Applied Informatics and Programming, Taraz Regional University, Taraz, 080000, Republic of Kazakhstan, e-mail: sagiissayev.1993kz@gmail.com, <https://orcid.org/0009-0008-0988-0952>

Issabekov Dauren Dzhambulovich, PhD, Professor, Faculty of Energetics, Toraighyrov University, Pavlodar, 140008, Republic of Kazakhstan, e-mail: Dauren_pvl2012@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0002-6673-5646>

Issabekov Zhanat Beisembayevich, PhD, Associate Professor, Head of the Department of Electrical Engineering and Automation of the Faculty of Energy, Toraighyrov University, Pavlodar, 140008, Republic of Kazakhstan, e-mail: zh_is@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0003-3980-1617>

Issabekova Bibigul Beisembayevna, PhD, Associate Professor, Faculty of computer science, «Toraighyrov University», Pavlodar, 140008, Republic of Kazakhstan, e-mail: asbikh@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0001-5044-3211>

Kaltayev Abdulla Gabdymanapuly, Associate Professor, Toraighyrov University, Pavlodar, 140000, Republic of Kazakhstan, e-mail: abdulla911@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0003-1684-3347>

Kamarova Saule Nurtazaevna, PhD, associate professor of the Department of Energy, Karaganda Industrial University, Karaganda region, Temirtau, 101400, Republic of Kazakhstan, e-mail: cfekt.rfvfhjdf@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0001-8464-7204>

Khazimov Marat, Kazakh National Agrarian Research University, Republic of Kazakhstan, city Almaty, Department Energy and Electrical Engineering,

professor Candidate of Technical Sciences, Almaty University of Power Engineering and Telecommunications named after Gumarbek Daukeyev, Republic of Kazakhstan, Almaty, Department of «Thermal power engineering and physics», professor, e-mail: mkhazimov@gmail.com, <https://orcid.org/0000-0001-5448-3122>, [Index 050063/A10E4B2](https://orcid.org/050063/A10E4B2)

Kinzhibekova Akmaral Kabidenovna, Professor, faculty of Energy, Toraighyrov university, Pavlodar, 140008, Republic of Kazakhstan, e-mail: akmaral70@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0001-5839-3001>

Kismanova Aigerim, Candidate of Technical Sciences, Associate Professor, Department of Electrical Equipment Operation, S. Seifullin Kazakh Agrotechnical Research University, Astana, 010011, Republic of Kazakhstan, e-mail: Kismanova08@mail.ru, <https://orcid.org/0009-0000-6150-0517>

Koishiyev Temirkhan, Doctor of Technical Sciences, Professor of Al-Farabi Kazakh National University, Department of Plasma Physics, Nanotechnology and Computer Physics, Faculty of Physics and Technology Almaty, 50040, Republic of Kazakhstan, e-mail: Temirkhan.Koishiyev@kaznu.edu.kz, <https://orcid.org/0000-0002-5320-6243>

Kuandyk Torebek, PhD Doctoral Student, Educational Program «Control of Technical Systems (8D07107)», Faculty of Energy, S. Seifullin Kazakh Agrotechnical Research University, Astana, 010011, Republic of Kazakhstan, e-mail: kuandyktorebek@gmail.com, <https://orcid.org/0009-0001-3198-9806>

Kuatova Anar Stalovna, doctoral student, Kazakh Agrotechnical Research University named after S. Seifullin, Department of Power Supply, Astana, 010000, Republic of Kazakhstan, e-mail: anarkuatova2019@gmail.com, <https://orcid.org/0000-0001-8972-1346>

Larkin Viktor, Deputy General Director for Production, «SevKazEnergoProm» Scientific and Production Company, Pavlodar, 140006, Republic of Kazakhstan, e-mail: r.tashlykova@skpe.kz, <https://orcid.org/0009-0008-2079-3358>

Makhambetov Yerbolat Nysanalyuly, PhD, Associate Professor, Chemical-metallurgical institute named after Zh. Abishev, Karaganda, 100009, Republic of Kazakhstan, e-mail: m.ye.n@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0001-8613-9932>

Makhanova Makhmuda, Candidate of Economic Sciences, Senior Lecturer, Institute of Energy, «Kazakh Agrotechnical Research University named after S. Seifullin» NCJSC, Astana, 010000, Republic of Kazakhstan, e-mail: murassayahat@mail.ru, <https://orcid.org/0009-0006-7090-869X>

Mashrapova Rizagul' Megdaniiatovna, doctor PhD, postdoctoral student, Faculty of Energy, Toraighyrov University, Pavlodar, 140008, Republic of Kazakhstan, e-mail: rizka1504@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0001-9509-5767>

Maximov Valeriy Yuryevich, PhD, Professor, Al-Farabi Kazakh National University, Almaty, 050040, Republic of Kazakhstan, e-mail: valeriy.maximov@kaznu.kz, <https://orcid.org/0000-0003-4120-1071>

Meirbekova Oxana Dairovna, Senior Lecturer, Akhmet Yassawi International Kazakh–Turkish University, Turkistan, 161200, Republic of Kazakhstan, e-mail: oksana_120183@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0003-0949-1443>

Mekhtiev Ali Javanshirovich, Candidate of Technikal Sciences, Associate Professor, Karaganda Technical University named after Abylkas Saginov, Member of the Board, Vice-Rector for Research, Karaganda, 100008, Republic of Kazakhstan, e-mail: barton.kz@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0002-2633-3976>

Mergalimova Almagul, PhD, Associate Professor, Institute of Energy, «Kazakh Agrotechnical Research University named after S. Seifullin» NCJSC, Astana, 010000, Republic of Kazakhstan, e-mail: almagul_mergalimova@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0002-5990-8182>

Meshherjakova Tatiyana, Candidate of technical sciences, associate professor, Satpayev University, Almaty, 050013, Republic of Kazakhstan, e-mail: meshherjakova_tanja@rambler.ru, <https://orcid.org/0000-0003-1910-8487>

Minazhova Saulesh, PhD, Researcher, «QazNRG Group» LLP, Almaty, 050060, Republic of Kazakhstan, e-mail: s.minazhova@satbayev.university, <https://orcid.org/0000-0002-5461-2251>

Moldasheva Gulnaz Maratovna, Master's student of Al-Farabi Kazakh National University, Faculty of Physics and Technology, Almaty, 050040, Republic of Kazakhstan, e-mail: sabyrova_ako@mail.ru, <https://orcid.org/0009-0005-4232-733X>

Mynbayeva Zauresh, Master of Technical Sciences, Senior lecturer of the Educational Program «Energy» at the Kazakh National University of Water Management and Irrigation, Taraz, 080013, Republic of Kazakhstan, e-mail: zauresh2610@gmail.com, <https://orcid.org/0009-0005-9853-7723>

Nalibayev Nurgali, Master of Technical Sciences, Senior lecturer of the Educational Program «Energy» at the Kazakh National University of Water Management and Irrigation, Taraz, 080013, Republic of Kazakhstan, e-mail: Nurgali20091978@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0002-5285-541X>

Nassim Rustamov Tulegenovich, Doctor of Technical Sciences, Senior Lecturer, Akhmet Yassawi International Kazakh–Turkish University, Turkistan, 161200, Republic of Kazakhstan, e-mail: nasim52@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0002-6437-6600>

Nauryzbay Uakhit, Doctoral student of «Heat and Power Engineering» Department, Toraighyrov University, Pavlodar, 140008, Republic of Kazakhstan, e-mail: nauryzmc@gmail.com, <https://orcid.org/0000-0002-1626-2895>

Neshina Yelena, Candidate of Technical Sciences, Associate Professor, Head of the Department of Energy Systems, NCJSC Karaganda technical university named A. Sagynov, Karaganda, 100026, Republic of Kazakhstan, e-mail: l_neg@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0002-8973-2958>

Niaz Muhammad, Tenured Professor, Department of Chemistry, Abdul Wali Khan University Mardan, Pakistan, 45320, Islamic Republic of Pakistan, e-mail: drniaz@awkum.edu.pk, <https://orcid.org/0000-0001-8431-192X>

Niyazbayev Adilkhan, Kazakh National Agrarian Research University, Almaty, Republic of Kazakhstan, Department «Agricultural machinery and machine building» head of Department associate professor, Head of Department, 050063/A10E4X7, e-mail: adil77@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0001-6753-5489>

Novozhilov Alexander Nikolaevich, Doctor of Technical Sciences, Professor, Department of «Electric Power Engineering», Toraighyrov University, Pavlodar, 140008, Republic of Kazakhstan, e-mail: novozhilova_on@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0001-7530-5034>

Novozhilov Timofey Alexandrovich, Candidate of Technical Sciences, Associate Professor of the Department «Power Supply of Industrial Enterprises», Omsk State Technical University, Omsk, 644050, Russian Federation, e-mail: timokvey@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0003-0293-7852>

Nurmaganbetova Gulim Sakhitovna, PhD, acting associate professor, Department of Power Supply, Kazakh Agrotechnical Research University named after S. Seifullin, Astana, 010000, Republic of Kazakhstan, e-mail: sahitovna@gmail.com, <https://orcid.org/0000-0002-9529-2477>

Nussipali Ayaulym, Master's student, student in 7M06201 -«Telecommunication» Kazakh National Research Technical University named after K. I. Satbayev Institute of Automation and Information Technologies, Almaty, 050013, Republic of Kazakhstan, e-mail: ayaulym.nussipali@kcell.kz, <https://orcid.org/0009-0009-2452-3387>

Oleinik Sergey Ivanovich, Candidate of Technical Sciences, Director of ENEKO LLP, Pavlodar, 140002, Republic of Kazakhstan, e-mail: olejnik_pte@mail.ru, <https://orcid.org/0009-0009-8007-7166>

Oleinikov Sergei, Candidate of Technical Sciences, Associate Professor, Institute of Industrial Technologies, West Kazakhstan University of Innovation and Technology, Uralsk, 090006, Republic of Kazakhstan, e-mail: oleinikov@mail.ru, <https://orcid.org/0009-0008-3751-9048>

Omarova Ardak Aubkirovna, senior lecturer, L. N. Gumilyov Eurasian National University, Astana, Z01C0X0, Republic of Kazakhstan, e-mail: ardak_omarova@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0001-5663-4414>

Orzhanova Zhanar Kerimbekovna, candidate of technical sciences, associate professor, leading engineer of the department for analysis and monitoring of power consumption of the Regional Electric Networks Administration, JSC «Alatau Zharyk Kompaniyasy» Almaty, 050000, Republic of Kazakhstan, e-mail: zhanar.orzhanova@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0002-5680-6674>

Petrov Pavel, PhD, associate Professor, Faculty of engineering and digital technology, «M. Kozybayev, North Kazakhstan university», Petropavlovsk, 150000, Republic of Kazakhstan, e-mail: paolo1988@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0001-6669-5149>

Podvalov Aleksandr, Candidate of Geographical Sciences, director LLP AG TECH, Astana, 010009, Republic of Kazakhstan, e-mail: info@ag-tech.kz, <http://orcid.org/0009-0003-3613-0130>

Sabyrova Aigerim Galymzhankyzy, Master's student of Al-Farabi Kazakh National University, Faculty of Physics and Technology, Almaty, 050040, Republic of Kazakhstan, e-mail: sabyrova_ako@mail.ru, <https://orcid.org/0009-0002-0015-8433>

Sadvakasova Aliya Pshanovna, Teacher of special disciplines, Almaty Financial and Economic College, 050042, Republic of Kazakhstan, e-mail: acp76@mail.ru, <https://orcid.org/0009-0004-3409-8680>

Sadyk Zhadiger Orysbayulu, Engineer, Chemical-metallurgical institute named after Zh. Abishev, Karaganda, 100009, Republic of Kazakhstan, e-mail: sadzhad03@gmail.com, <https://orcid.org/0009-0006-8557-1532>

Sadykova Lyzat, Candidate of Technical Sciences, Associate Professor, Institute of Industrial Technologies, West Kazakhstan University of Innovation and Technology, Uralsk, 090006, Republic of Kazakhstan, e-mail: archisad@mail.ru, <https://orcid.org/0009-0005-3786-8529>

Safarbakov Alexey Albertovich, Candidate of Technical Sciences, Director of Pavlodartekhenenergo LLP, Pavlodar, 140002, Republic of Kazakhstan, e-mail: safarbakov@mail.ru, <https://orcid.org/0009-0007-4104-3225>

Sagytayeva Kuralay Asetovna, senior teacher, Almaty University of Power Engineering and Telecommunications named after Gumarbek Daukeyev, Almaty, 050013, Republic of Kazakhstan, e-mail: k.sagytayeva@aes.kz, <https://orcid.org/0000-0001-8464-7204>

Salimov Yernar Yerlanuly, Expert, master, Department of Plasma Physics, Faculty of Physics and Technology, Al-Farabi Kazakh National

University, Almaty, 050040, Republic of Kazakhstan, e-mail: Ernar1996@gmail.com, <https://orcid.org/0009-0005-7712-6263>

Sarguzhieva Bibigul, Senior Lecturer, Institute of Industrial Technologies, West Kazakhstan University of Innovation and Technology, Uralsk. 090006, Republic of Kazakhstan, e-mail: sarguziyevabibi@gmail.com, <https://orcid.org/0000-0003-2618-9529>

Sarsenbayev Yerlan Aliaskarovich, PhD, Associate Professor, Kazakh National Research Technical University named after K. I. Satpayev, Almaty, 050000, Republic of Kazakhstan, e-mail: y.sarsenbayev@satbayev.university, <https://orcid.org/0000-0002-8887-1171>

Seitenova Gaini, Candidate of Chemical Sciences, Associate Professor at L. N. Gumilyov Eurasian National University, Astana, 010000, Republic of Kazakhstan, e-mail: gainiseitenova@gmail.com, <https://orcid.org/0000-0001-6202-3951>

Sergeevs Yakobs, doctoral student, Toraigyrov University, Pavlodar, 140000, Republic of Kazakhstan, e-mail: Sergeevs_yakobs@mail.ru, <https://orcid.org/0009-0009-2090-9143>

Sheryazov Saken Koishybaevich, Doctor of Technical Sciences, Professor, Department of «Energy Supply and Automation of Technological Processes», South Ural State Agrarian University, 454080, Chelyabinsk, Russian Federation, e-mail: sakenu@yandex.ru, <https://orcid.org/0000-0001-8795-5114>

Shukuraliev Abrorbek Shukuralievich, PhD, associate professor, Andijan State Technical Institute, Faculty of Electrical Engineering and Energy, Andijan, 171100, Republic of Uzbekistan, e-mail: abrorbekshukuraliyev7@gmail.com, <https://orcid.org/0008-0007-7589-006>

Smagulova Karshiga Kanatovna, PhD doctor, docent Department of «Automation of production processes» Abylka Saginov Karaganda Technical University, Karaganda, 100027, Republic of Kazakhstan, e-mail: k.k.smagulova@ktu.edu.kz, <https://orcid.org/0000-0001-6834-8490>

Smailov Nurzhigit, PhD, associate professor, Kazakh National Research Technical University named after K. I. Satbayev, Institute of Automation and Information Technologies, Almaty, 050013, Republic of Kazakhstan, e-mail: n.smailov@satbayev.university, <https://orcid.org/0000-0002-7264-2390>

Suleimenova Duriya Toleugalymovna, Master of science Degree, doctoral student in the educational program «Electric Power Industry», Almaty University of Power Engineering and Telecommunications named after Gumarbek Daukeyev, Almaty, 050000, Republic of Kazakhstan, e-mail: duriyasuleimenova@mail.ru, <https://orcid.org/0009-0005-1996-8235>

Taissariyeva Kyrmyzy, PhD, associate professor, Kazakh National Research Technical University named after K. I. Satbayev, Institute of Automation and Information Technologies, Almaty, 050013, Republic of Kazakhstan, e-mail: k.taisariyeva@satbayev.university, <https://orcid.org/0000-0002-1949-4288>

Talipov Olzhas Manarbekovich, PhD (specialization Electrical Power Engineering), Professor, Dean of the Faculty of Energy, Toraigyrov University, Pavlodar, 140008, Republic of Kazakhstan, e-mail: talipov1980@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0002-8355-1769>

Tananova Dana Dastanovna, MSc, Researcher, «QazNRG Group» LLP, Republic of Kazakhstan, 050060, Almaty, e-mail: tananova.dana@gmail.com, <https://orcid.org/0000-0002-1175-8525>

Tashlykova Raisa, Advisor to the General Director of NPF «SevKazEnergoProm» LLP, Pavlodar, 140006, Republic of Kazakhstan, e-mail: r.tashlykova@skep.kz, <https://orcid.org/0009-0004-7285-9305>

Tleshova Akmaral Skhanovna, senior lecturer, Taraz University named after M. H. Dulati, Taraz, 080000, Republic of Kazakhstan, e-mail: akmaral.tleshova@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0002-4594-5265>

Toibazar Daulet, Almaty University of Power Engineering and Telecommunications named after Gumarbek Daukeyev, Republic of Kazakhstan, city Almaty, Department of «Electric Power Engineering», senior lecturer, Kazakh National Agrarian Research University, junior researcher city Almaty, 050062/A10X5Y5, Republic of Kazakhstan, Department «Energy and Electrical Engineering» e-mail: d.toibazar@aues.kz, <https://orcid.org/0009-0002-4978-4400>

Toktarov Dimash Daurenuly, Doctoral Student in «Thermal Power Engineering», Al-Farabi Kazakh National University, Almaty, 050040, Republic of Kazakhstan, e-mail: toktarow@gmail.com, <https://orcid.org/0009-0005-9557-9012>

Turbekova Arysgul, Candidate of Agricultural Sciences, Associate Professor, Department of Agriculture and Crop Production, S. Seifullin Kazakh Agrotechnical Research University, Astana, 010011, Republic of Kazakhstan, e-mail: arysgul.turbekova.67@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0002-9689-4509>

Tyulyuganova Lyazzat Baltabayevna, doctoral student in Electrical Engineering Faculty of Energy, Toraigyrov University, Pavlodar, 140008, Republic of Kazakhstan, e-mail: leonard7@internet.ru, <https://orcid.org/0000-0002-7632-3098>

Yaroslavtsev Mikhail Viktorovich, Candidate of Technical Sciences, Associate Professor, Faculty of Energy, Toraigyrov University, Pavlodar, 140008, Republic of Kazakhstan, e-mail: myaroslavtsev@yandex.ru, <https://orcid.org/0000-0002-1440-2065>

Ybray Sultan, Master of Technical Sciences, Senior Lecturer, Institute of Energy, «Kazakh Agrotechnical Research University named after S. Seifullin» NCJSC, Astana, 010000, Republic of Kazakhstan, e-mail: Sultanybray@gmail.com, <https://orcid.org/0000-0002-5262-2149>

Yerbayev Yerbol, Doctor PhD, acting associate professor, NJSC «West Kazakhstan Agrarian and Technical University named after Zhangir khan», Uralsk, 090009, Republic of Kazakhstan, e-mail: erbol.erbaev@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0002-3186-9994>

Yergaliyev Azamat Bagdatovich, lecturer-assistant of the Department of Electrical Engineering and Automation, Faculty of Energy, Toraighyrov University, Pavlodar, 140008, Republic of Kazakhstan, e-mail: yergaliyev10@gmail.com, <https://orcid.org/0009-0001-1315-2615>

Zhalmagambetova Ultuar, PhD, Professor of the Department of Thermal power engineering, Faculty Power engineers, Pavlodar, 140008, Republic of Kazakhstan, e-mail: ultuara@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0002-2261-2222>

Zhanpeyisova Aizhan Orynbekovna, PhD Student, Kazakh National Research Technical University named after K. I. Satpayev (KazNITU), Almaty, 050013, Republic of Kazakhstan, e-mail: Ayzhan.zhanpeisova@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0001-5040-428X>

Zhapbasbayev Uzak Kaibekovich, doctor of technical sciences, Professor, head of Research and Production Laboratory «Energy Modeling», Satbayev University, Almaty, 050013, Republic of Kazakhstan, e-mail: uzak.zh@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0001-5973-5149>

Zhukeshov Anuar Muratuly, Professor, doctor of physical and mathematical sciences, Department of Plasma Physics, Faculty of Physics and Technology, Al-Farabi Kazakh National University, Almaty, 050040, Republic of Kazakhstan, e-mail: zhukeshov@physics.kz, <https://orcid.org/0000-0001-9153-323X>

Zia Ur Rehman, Tenured Professor, Department of Chemistry, Quaid-i-Azam University, Islamabad, 45320, Islamic Republic of Pakistan, e-mail: zrehman@qau.edu.pk, <https://orcid.org/0000-0002-1436-3131>

ПРАВИЛА ДЛЯ АВТОРОВ В НАУЧНОМ ЖУРНАЛЕ «ВЕСТНИК ТОРАЙГЫРОВ УНИВЕРСИТЕТА» ЮРИДИЧЕСКАЯ СЕРИЯ»

Редакционная коллегия просит авторов руководствоваться следующими правилами при подготовке статей для опубликования в журнале.

Научные статьи, представляемые в редакцию журнала должны быть оформлены согласно базовым издательским стандартам по оформлению статей в соответствии с ГОСТ 7.5-98 «Журналы, сборники, информационные издания. Издательское оформление публикуемых материалов», пристатейных библиографических списков в соответствии с ГОСТ 7.1-2003 «Библиографическая запись. Библиографическое описание. Общие требования и правила составления».

- В номер допускается не более одной рукописи от одного автора либо того же автора в составе коллектива соавторов.

- Количество соавторов одной статьи не более 5.

- Степень оригинальности статьи должна составлять не менее 60 % (согласно решению редакционной коллегии).

- Направляемые статьи не должны быть ранее опубликованы, не допускается последующее опубликование в других журналах, в том числе переводы на другие языки.

- Решение о принятии рукописи к опубликованию принимается после проведения процедуры рецензирования.

- Двойное рецензирование (слепое) проводится конфиденциально, автору не сообщается имя рецензента, а рецензенту – имя автора статьи.

- Квитанция об оплате предоставляется после принятия статей к публикации. Стоимость публикации в журнале составляет 3 600 (три тысячи шестьсот) тенге.

- Докторантам НАО «Торайғыров университет» и иностранным авторам (без казахстанских соавторов) публикация в журнале бесплатно.

Если статья отклонена антиплагиатом или рецензентом статья возвращается автору на доработку. Автор может повторно отправить статью на антиплагиат или рецензирования 1 раз. Ответственность за содержание статьи несет автор.

Редакция не занимается литературной и стилистической обработкой статьи.

Статьи, оформленные с нарушением требований, к публикации не принимаются и возвращаются авторам.

Датой поступления статьи считается дата получения редакцией ее окончательного варианта.

Статьи публикуются по мере поступления. Журнал формируется исходя из количества не более 30 статей в одном номере.

Периодичность издания журналов – 4 раза в год (ежеквартально).

Сроки подачи статьи:

- первый квартал до 10 февраля;
- второй квартал до 10 мая;
- третий квартал до 10 августа;
- четвертый квартал до 10 ноября.

Журнал «Вестник Торайғыров университета. Юридическая серия» выпускается с периодичностью 4 раза в год в сетевом (электронном) формате в следующие установленные сроки выхода номеров журнала:

- первый номер выпускается до 30 марта текущего года;
- второй номер – до 30 июня;
- третий номер – до 30 сентября;
- четвертый номер – до 30 декабря.

Статью (электронную версию и квитанции об оплате) следует направлять на сайт: <https://vestnik.tou.edu.kz/>.

Для подачи статьи на публикацию необходимо пройти регистрацию на сайте.

Автор, который внес наибольший интеллектуальный вклад в подготовку рукописи (при двух и более соавторах), является автором-корреспондентом и обозначается «*».

Авторы из разных учебных заведений указываются цифрами ^{1,2}.

Для осуществления процедуры двойного рецензирования (слепого), авторам необходимо отправлять два варианта статьи: первый – с указанием личных данных, второй – без указания личных данных. При нарушении принципа слепого рецензирования статья не рассматривается.

Статьи должны быть оформлены в строгом соответствии со следующими правилами:

– В журналы принимаются статьи по всем научным направлениям, в электронном варианте со всеми материалами в текстовом редакторе «Microsoft Office Word (97, 2000, 2007, 2010) для Windows» (в форматах .doc, .docx, .rtf).

– Общий объем статьи, включая аннотации, литературу, таблицы, рисунки и математические формулы должен составлять **не менее 5 и не более 12 страниц печатного текста. Поля страниц – 30 мм со всех сторон листа; Текст статьи: кегль – 14 пунктов, гарнитура – Times New Roman (для русского, английского и немецкого языков), KZ Times New Roman (для казахского языка).**

Структура научной статьи включает название, аннотация, ключевые слова, основные положения, введение, материалы и методы, результаты и обсуждение, заключение, выводы, информацию о финансировании (при наличии), список использованных источников (литературы) к каждой статье, включая романизированный (транслитерированный латинским алфавитом) вариант написания источников на кириллице (на казахском и русском языках) *см. ГОСТ 7.79–2000 (ИСО 9–95) Правила транслитерации кирилловского письма латинским алфавитом.*

Статья должна содержать:

1 **МРНТИ** (Межгосударственный рубрикатор научной технической информации);

2 **DOI** – после МРНТИ в верхнем правом углу (присваивается и заполняется редакцией журнала);

3 **Инициалы (имя, отчество) Фамилия автора (-ов)** – на казахском, русском и английском языках (*жирным шрифтом, по центру*);

Автор, который внес наибольший интеллектуальный вклад в подготовку рукописи (при двух и более соавторах), является автором-корреспондентом и обозначается «*».

Авторы из разных учебных заведений указываются цифрами ^{1,2}.

4 **Аффилиация** (организация (место работы (учебы)), страна, город) – на казахском, русском и английском языках. **Полные данные об аффилиации авторов представляются в конце журнала;**

6 **E-mail;**

7 **Название статьи** должно отражать содержание статьи, тематику и результаты проведенного научного исследования. В название статьи необходимо вложить информативность, привлекательность и уникальность (не более 12 слов, прописными буквами, жирным шрифтом, по центру, на трех языках: русский, казахский, английский либо немецкий);

8 **Аннотация** – краткая характеристика назначения, содержания, вида, формы и других особенностей статьи. Должна отражать основные и ценные, по мнению автора, этапы, объекты, их признаки и выводы проведенного исследования. Дается на казахском, русском и английском либо немецком языках (*рекомендуемый объем аннотации на языке публикации – не менее 150, не более 300 слов, курсив, нежирным шрифтом, кегль – 12 пунктов, абзацный отступ слева и справа 1 см, см. образец*);

9 **Ключевые слова** – набор слов, отражающих содержание текста в терминах объекта, научной отрасли и методов исследования (*оформляются на трех языках: русский, казахский, английский либо немецкий; кегль – 12 пунктов, курсив, отступ слева-справа – 1 см.*). Рекомендуемое количество

ключевых слов – 5-8, количество слов внутри ключевой фразы – не более 3. Задаются в порядке их значимости, т.е. самое важное ключевое слово статьи должно быть первым в списке (см. образец);

10 Основной текст статьи излагается в определенной последовательности его частей, включает в себя:

- **Введение** (абзац 1 см по левому краю, жирными буквами, кегль – 14 пунктов). Обоснование выбора темы; актуальность темы или проблемы. Актуальность темы определяется общим интересом к изученности данного объекта, но отсутствием исчерпывающих ответов на имеющиеся вопросы, она доказывается теоретической или практической значимостью темы.

- **Материалы и методы** (абзац 1 см по левому краю, жирными буквами, кегль – 14 пунктов). Должны состоять из описания материалов и хода работы, а также полного описания использованных методов.

- **Результаты и обсуждение** (абзац 1 см по левому краю, жирными буквами, кегль – 14 пунктов). Приводится анализ и обсуждение полученных вами результатов исследования. Приводятся выводы по полученным в ходе исследования результатам, раскрывается основная суть. И это один из самых важных разделов статьи. В нем необходимо провести анализ результатов своей работы и обсуждение соответствующих результатов в сравнении с предыдущими работами, анализами и выводами.

- **Информацию о финансировании (при наличии)** (абзац 1 см по левому краю, жирными буквами, кегль – 14 пунктов).

- **Выводы** (абзац 1 см по левому краю, жирными буквами, кегль – 14 пунктов).

Выводы – обобщение и подведение итогов работы на данном этапе; подтверждение истинности выдвигаемого утверждения, высказанного автором, и заключение автора об изменении научного знания с учетом полученных результатов. Выводы не должны быть абстрактными, они должны быть использованы для обобщения результатов исследования в той или иной научной области, с описанием предложений или возможностей дальнейшей работы.

- **Список использованных источников** (жирными буквами, кегль – 14 пунктов, в центре).

Статья и список использованных источников должны быть оформлены в соответствии с ГОСТ 7.5-98; ГОСТ 7.1-2003 (см. образец).

Очередность источников определяется следующим образом: сначала последовательные ссылки, т.е. источники на которые вы ссылаетесь по очередности в самой статье. Затем дополнительные источники, на которых нет ссылок, т.е. источники, которые не имели место в статье, но рекомендованы вами читателям для ознакомления, как смежные работы, проводимые

параллельно. Объем не менее 10, не более чем 20 наименований (ссылки и примечания в статье обозначаются сквозной нумерацией и заключаются в квадратные скобки), преимущественно за последние 10-15 лет.

В случае наличия в списке использованных источников работ на кириллице (на казахском и русском языках), необходимо представить список литературы в двух вариантах: 1) в оригинале (указываются источники на русском, казахском и английском либо немецком языках); 2) романизированный вариант написания источников на кириллице (на казахском и русском языках), то есть транслитерация латинским алфавитом. см. ГОСТ 7.79–2000 (ИСО 9–95) Правила транслитерации кирилловского письма латинским алфавитом.

Онлайн сервис Транслитерация по ГОСТу – <https://transliteration-online.ru/>

Правила транслитерации кирилловского письма латинским алфавитом.

Романизированный список литературы должен выглядеть следующим образом: автор(-ы) (транслитерация либо англоязычный вариант при его наличии) → название статьи в транслитерированном варианте → [перевод названия статьи на английский язык в квадратных скобках] → название казахоязычного либо русскоязычного источника (транслитерация, либо английское название при его наличии) → выходные данные с обозначениями на английском языке.

• **Иллюстрации, перечень рисунков и подписанные надписи к ним** представляют по тексту статьи. В электронной версии рисунки и иллюстрации представляются в формате TIF или JPG с разрешением не менее 300 dpi.

• **Математические формулы** должны быть набраны в Microsoft Equation Editor (каждая формула – один объект).

На отдельной странице (после статьи)

В электронном варианте приводятся полные почтовые адреса, номера служебного и домашнего телефонов, e-mail (номер телефона для связи редакции с авторами, не публикуются);

Сведения об авторах

На казахском языке	На русском языке	На английском языке
Фамилия Имя Отчество (полностью)		
Должность, ученая степень, звание		
Организация		
Город		
Индекс		
Страна		
E-mail		
Телефон		

140008, Республика Казахстан, г. Павлодар, ул. Ломова, 64,
НАО «Торайғыров университет»,
Издательство «Toraighyrov University», каб. 137,
кафедра «Психология и педагогика»
 Тел. 8 (7182) 67-36-69, (внутр. 1147, 1139).
 E-mail: touscientificjournal@bk.ru

Наши реквизиты:

НАО «Торайғыров университет» РНН 451800030073 БИН 990140004654	НАО «Торайғыров университет» РНН 451800030073 БИН 990140004654	Приложение kaspi.kz Платежи – Образование – Оплата за ВУЗы – Заполняете все графы (в графе Факультет укажите «За публикацию в научном журнале, название журнала и серии»)
АО «Jysan Bank» ИИК KZ57998FTB00 00003310 БИК TSESKZK A Кбе 16 Код 16 КНП 861	АО «Народный Банк Казахстана» ИИК KZ156010241000003308 БИК HSBKZZKX Кбе 16 Код 16 КНП 861	

ОБРАЗЕЦ К ОФОРМЛЕНИЮ СТАТЕЙ

FTAMP 107151

DOI xxxxxxxxxxxxxxxx

*Н. М. Мусабекова, Ә. Д. Досымжан

Торайғыров университет, Республика Казахстан, г. Павлодар

ПРАВОВЫЕ АСПЕКТЫ ДЕЯТЕЛЬНОСТИ ОРГАНОВ МИНИСТЕРСТВА ЮСТИЦИИ РЕСПУБЛИКИ КАЗАХСТАН

Данная тема очень актуальна на сегодняшний день, так как изменения, происходящие в обществе, коснулись и системы правоохранительных органов. Органы юстиции также подверглись существенному реформированию. С тех пор, как наша Республика обрела государственную независимость, прошло более десяти лет. За это короткое, в плане исторического развития время страна претерпела глобальные общественно-политические преобразования. Республика Казахстан обрела независимость и стала суверенным государством, признанным мировым сообществом. Рождается новое гражданское общество и демократическое и правовое государство с президентской формой правления, утверждаются политические свободы, гарантированные Конституцией Республики Казахстан принятой на всенародном референдуме 30 августа 1995 года. Происходит реформирование, экономики – формируется разные формы собственности, рыночные отношения, законодательства - совершенствуется нормативная правовая база в соответствии с международным правом. Одним словом, началась новая не только по хронологии, но и по содержанию эпоха в истории казахского народа, Республики Казахстан. В связи с этим претерпели изменения соответствующие государственные органы. Одним из таких государственных органов является Министерство юстиции Республики Казахстан и его территориальные подразделения. Роль органов юстиция значительно возросла за счет деятельности по государственной регистрации юридических лиц, недвижимост, ценных бумаг, государственной экспертизы, дознания и других видов работ.

Ключевые слова: административное законодательство, административная ответственность, органы юстиции, формы собственности, правовая деятельность.

Введение

В Конституции Республики Казахстан утверждалось, что «наша страна заявляет о себе как о демократическом, светском, правовом и социальном государстве, ее самым драгоценным сокровищем является человеческая жизнь, права и свободы человека» [1, 3 с.]. Одним из источников государственной власти является народ.

Продолжение текста публикуемого материала

Материалы и методы

Для исследования проблемы используются теоретический анализ литературы и статистический анализ, логический анализ, исторические методы и методы анализа административного законодательства и нормативных правовых актов. Деятельность Министерства юстиции непосредственно влияет на жизнь каждого гражданина Казахстана.

Продолжение текста публикуемого материала

Результаты и обсуждение

Единая система органов юстиции: Министерство юстиции Республики Казахстан; Комитеты Министерства юстиции Республики Казахстан; территориальные органы юстиции; органы уголовно-исполнительной системы; органы исполнительного производства; учреждений и других подведомственных организаций.

Продолжение текста публикуемого материала

Информация о финансировании (при наличии)

Продолжение текста публикуемого материала

Выводы

Понятно, что реализовать достигнутые достижения невозможно без неустанного, стабильного, проекта Министерства юстиции Республики Казахстан.

Продолжение текста публикуемого материала

Список использованных источников

- 1 Конституция РК (принята 30 августа 1995 года) (с изменениями и дополнениями по состоянию на 2019 год).
- 2 Закон РК «Об органах юстиции» от 18.03.2002 года № 304.
- 3 Закон РК «Об исполнительном производстве и статусе судебных исполнителей» от 02.04.2010 года № 261.
- 4 Положение «О Министерстве юстиции Республики Казахстан» от 28.10.2004 года № 1120.

5 Указ Президента Республики Казахстан от 16 июня 1993 года № 1228 «О мерах по повышению эффективности правовой реформы в Республике Казахстан».

6 Кодекс Республики Казахстан от 30.01.2001 года «Об административных правонарушениях».

7 **Ибрагимов, Х.** Правоохранительные органы // органы и учреждения юстиции, 2000. – С. 38–46.

8 **Журсимбаев, С.** Правоохранительные органы в Республике Казахстан // Органы юстиции в Республике Казахстан, 2010. – С.114–139.

9 **Пак, Е.** О министерстве юстиции Республики Казахстан предприниматель и право, 1997. – С. 27– 30.

10 **Ракышев, К.** Правоохранительные органы в Республике Казахстан // Органы юстиции в Республике Казахстан, 2010. – С.114–139.

REFERENCES

- 1 Konstituciya Respubliki Kazahstan ot 30 avgusta 1995 goda [Constitution of the Republic of Kazakhstan dated August 30, 1995] [Text].
- 2 Zakon RK «Ob organah yusticii» ot 18.03.2002 goda № 304 [«Law of the Republic of Kazakhstan on judicial authorities» dated 18.03.2002 No. 304] [Text].
- 3 Zakon RK «Ob ispolnitelnom proizvodstve i statute sudebnyh ispolnitelej» ot 02.04.2010 goda № 261 [Law of the Republic of Kazakhstan «On enforcement proceedings and the status of bailiffs» dated 02.04.2010 No. 261] [Text].
- 4 Polozhenie o Ministerstve yusticii Respubliki Kazahstan ot 28.10.2004 goda [«On the Ministry of Justice of the Republic of Kazakhstan» 28.10.2004 № 1120] [Text].
- 5 Ukaz Prezidenta Respubliki Kazahstan ot 16 iyunya 1993 goda № 1228 «O merah po povysheniyu effektivnosti pravovoj reformy v Respublike Kazahstan» [Decree of the president of the Republic of Kazakhstan dated June 16, 1993 No. 1228 «On measures to improve the effectiveness of legal reform in the Republic of Kazakhstan»] [Text].
- 6 Kodeks Respubliki Kazahstan ot 30.01.2001 goda «Ob administrativnyh pravonarusheniyah» [Code of the Republic of Kazakhstan dated 30.01.2001 «On administrative offenses»] [Text].
- 7 **Ibragimov, H.** [Law enforcement agencies], [Text]. Pravoohranitel'nye organy // Organy i uchrezhdeniya yusticii, // Bodies and institutions of Justice] 2000. – P. 38–46.
- 8 **Zhursimbayev, S.** Pravoohranitel'nye organy v Respublike Kazahstan // Organy yusticii v Respublike Kazahstan, 2010 / [«Law enforcement agencies in

the Republic of Kazakhstan» // [justice agencies in the Republic of Kazakhstan], 2000 [Text]. – P. 114–139.

9 **Pak, E.** O Ministerstve yusticii Respubliki Kazahstan predprinimatel' i pravo [On the Ministry of Justice of the Republic of Kazakhstan entrepreneur and law] [Text]. – 1997. – P. 27–30.

10 **Rakishev, K.** Nekotorye aspekty deyatel'nosti Ministerstva yusticii RK v sfere pravovogo regulirovaniya [Some aspects of the activities of the Ministry of Justice of the Republic of Kazakhstan in the field of Legal Regulation] [Text]. 1998. – 13 p.

*Н. М. Мусабекова, Ә. Д. Досымжан

Торайғыров университет,
Қазақстан Республикасы, Павлодар қ.

ҚАЗАҚСТАН РЕСПУБЛИКАСЫ ӘДІЛЕТ МИНИСТРЛІГІ ОРГАНДАРЫ ҚЫЗМЕТІНІҢ ҚҰҚЫҚТЫҚ АСПЕКТІЛЕРІ

Бұл тақырып бүгінгі күні өте өзекті, өйткені қоғамда болып жатқан өзгерістер құқық қорғау органдарының жүйесіне де әсер етті. Әділет органдары да елеулі реформалардан өтті. Біздің Республикамыз мемлекеттік тәуелсіздік алғаннан бері он жылдан астам уақыт өтті. Осы қысқа уақыт ішінде тарихи даму тұрғысынан еліміз жаһандық қоғамдық-саяси өзгерістерге ұшырады. Қазақстан өз тарихындағы күрделі, бетбұрысты кезеңді бастан өткеруде. Қазақстан Республикасы Тәуелсіздігін алды және әлемдік қоғамдастық таныған Егемен мемлекетке айналды. Президенттік басқару нысанындағы жаңа Азаматтық қоғам мен демократиялық және құқықтық мемлекет пайда болады, 1995 жылғы 30 тамызда жалпыхалықтық референдумда қабылданған Қазақстан Республикасының Конституциясында кепілдік берілген саяси бостандықтар бекітіледі. Мемлекеттік органдардың бірі Қазақстан Республикасының Әділет министрлігі және оның аумақтық бөлімшелері болып табылады. Әділет органдарының рөлі заңды тұлғаларды, жылжымайтын мүлікті, бағалы қағаздарды, мемлекеттік сараптаманы, анықтауды және басқа да жұмыс түрлерін мемлекеттік тіркеу жөніндегі қызмет есебінен едәуір өсті.

Кілтті сөздер: әкімшілік заңнама, әкімшілік жауаптылық, әділет органдары, меншік нысандары, құқықтық қызмет.

*N. M. Musabekova, A. D. Dossymzhan

Toraighyrov University,
Republic of Kazakhstan, Pavlodar.

LEGAL ASPECTS OF THE ACTIVITIES OF THE BODIES OF THE MINISTRY OF JUSTICE OF THE REPUBLIC OF KAZAKHSTAN

This topic is very relevant today, as the changes taking place in society have also affected the system of law enforcement agencies. The judicial authorities have also undergone significant reforms. More than ten years have passed since our Republic gained state independence. During this short time, in terms of historical development, the country has undergone global socio-political transformations. Kazakhstan is going through a difficult, turning point in its history now. The Republic of Kazakhstan gained independence and became a sovereign state recognized by the world community. A new civil society and a democratic and legal state with a presidential form of government are being born, political freedoms guaranteed by the Constitution of the Republic of Kazakhstan adopted at a national referendum on August 30, 1995 are being approved. The economy is being reformed – various forms of ownership, market relations, legislation are being formed – the regulatory legal framework is being improved in accordance with international law. In a word, a new epoch in the history of the Kazakh people, the Republic of Kazakhstan, has begun not only in chronology, but also in content. In this regard, the relevant state bodies have undergone changes. One of such state bodies is the Ministry of Justice of the Republic of Kazakhstan and its territorial divisions. The role of the justice authorities has significantly increased due to the activities of state registration of legal entities, real estate, securities, state expertise, inquiry and other types of work.

Keywords: administrative legislation, administrative responsibility, judicial authorities, forms of ownership, legal activity.

Сведения об авторах

На казахском языке	На русском языке	На английском языке
Мусабекова Нурсулун Мукидиновна, тарих ғылымдарының Кандидаты, профессор, Торайғыров университеті, профессоры, Павлодар, 140008, Қазақстан Республикасы, musabekova.1979@mail.ru, 8-000-000-00-00	Мусабекова Нурсулун Мукидиновна кандидат исторических наук, профессор, Торайғыров университет, Павлодар, 140008, Республика Казахстан, musabekova.1979@mail.ru 8-000-000-00-00	Musabekova Nursulun Mukidinovna, Candidate of Historical Sciences, professor, Toraighyrov University, Pavlodar, 140008, Republic of Kazakhstan, musabekova.1979@mail.ru, 8-000-000-00-00
Досымжан Әйгерім Досымжанқызы, аға оқытушы, Торайғыров университеті, Павлодар, 140008, Қазақстан Республикасы, dossymzhan.a@mail.ru 8-000-000-00-00	Досымжан Әйгерім Досымжанқызы, старший преподаватель, Торайғыров университет, Павлодар, 140008, Республика Казахстан, dossymzhan.a@mail.ru 8-000-000-00-00	Dosymzhan Aigerim Dosymzhankyzy, Senior lecturer, Toraighyrov University, Pavlodar, 140008, Republic of Kazakhstan, dossymzhan.a@mail.ru, 8-000-000-00-00

**ПУБЛИКАЦИОННАЯ ЭТИКА
НАУЧНОГО ЖУРНАЛА
«ВЕСТНИК ТОРАЙГЫРОВ УНИВЕРСИТЕТА.
ЮРИДИЧЕСКАЯ СЕРИЯ»**

Члены редакционной коллегии научного журнала «Вестник Торайғыров университета. Юридическая серия» в своей профессиональной деятельности придерживаются принципов и норм Публикационной этики научных журналов НАО «Торайғыров университет». Публикационная этика разработана в соответствии с международной публикационной этической нормой Комитета по публикационной этике (COPE), этическими принципами публикации журналов Scopus (Elsevier), Кодекса академической честности НАО «Торайғыров университет».

Публикационная этика определяет нормы, принципы и стандарты этического поведения редакторов, рецензентов и авторов, меры по выявлению конфликтов интересов, неэтичного поведения, инструкции по изъятию (ретракции), исправлению и опровержению статьи.

Все участники процесса публикации, соблюдают принципы, нормы и стандарты публикационной этики.

Качество научного журнала обеспечивается исполнением принципов участников процесса публикации: равенства всех авторов, принцип конфиденциальности, однократные публикации, авторства рукописи, принцип оригинальности, принцип подтверждения источников, принцип объективности и своевременности рецензирования.

Права и обязанности членов редакционной коллегии научного журнала «Вестник Торайғыров университета. Юридическая серия» определены СО СМК 8.12.3-23 Управление научно-издательской деятельностью.

Права и обязанности рецензентов

Рецензенты журнала «Вестник Торайғыров университета. Юридическая серия» обязаны руководствоваться принципу *объективности*.

Персональная критика в адрес автора(-ов) рукописи недопустима. Рецензент должен аргументировать свои замечания и обосновывать свое решение о принятии рукописи или о ее отклонении.

Национальность, религиозная принадлежность, политические или иные взгляды автора(-ов) не должны приниматься во внимание и учитываться в процессе рецензирования рукописи рецензентом(-ами).

Экспертная оценка, составленная рецензентом должна способствовать принятию решения редакцией о публикации и помогать автору улучшить рукопись.

Решение о принятии рукописи к публикации, возвращение работы автору на изменение или доработку, либо решение об отклонении от публикации принимается редколлегией опираясь на результаты рецензирования.

Принцип своевременности рецензирования. Рецензент обязан предоставить рецензию в срок, определенный редакцией, но не позднее 2-4 недель с момента получения рукописи на рецензирование. Если рассмотрение статьи и подготовка рецензии в назначенные сроки невозможны, то рецензент должен незамедлительно уведомить об этом научного редактора.

Рецензент, который считает, что его квалификация не соответствует либо недостаточна для принятия решения при рецензировании предоставленной рукописи должен незамедлительно сообщить об этом научному редактору и отказаться от рецензирования рукописи.

Принцип конфиденциальности со стороны рецензента. Рукопись, предоставленная рецензенту на рецензирование должна рассматриваться как конфиденциальный материал. Рецензент имеет право демонстрировать ее и/или обсуждать с другими лицами только после получения письменного разрешения со стороны научного редактора журнала и/или автора(-ов).

Информация и идеи научной работы, полученные в ходе рецензирования и обеспечения публикационного процесса, не должны быть использованы рецензентом(-ами) для получения личной выгоды.

Принцип подтверждения источников. Рецензент должен указать научные работы, которые оказали бы влияние на исследовательские результаты рассматриваемой рукописи, но не были приведены автором(-ами). Также рецензент обязан обратить внимание научного редактора на значительное сходство или совпадение между рассматриваемой рукописью и ранее опубликованной работой, о котором ему известно.

Если у рецензента имеются достаточные основания полагать, что в рукописи содержится плагиат, некорректные заимствования, ложные и сфабрикованные материалы или результаты исследования, то он не должен допустить рукопись к публикации и проинформировать научного редактора журнала о выявленных нарушениях принципов, стандартов и норм публикационной и научной этики.

Права и обязанности авторов

Публикационная этика базируется на соблюдении принципов:

Однократность публикации. Автор(-ы) гарантируют что представленная в редакцию рукопись статьи не была представлена для рассмотрения в другие издания. Представление рукописи одновременно в нескольких журналах/изданиях неприемлемо и является грубым нарушением принципов, стандартов и норм публикационной этики.

Авторство рукописи. Лицо, которое внесло наибольший интеллектуальный вклад в подготовку рукописи (при двух и более соавторах), является автором-корреспондентом и указывается первым в списке авторов.

Для каждой статьи должен быть назначен автор для корреспонденции, который отвечает за подготовку финальной версии статьи, коммуникацию с редколлегией, должен обеспечить включение всех участников исследования (при количестве авторов более одного), внесших в него достаточный вклад, в список авторов, а также получить одобрение окончательной версии рукописи от всех авторов для представления в редакцию для публикации. Все авторы, указанные в рукописи/статье, несут ответственность за содержание работы.

Принцип оригинальности. Автор(-ы) гарантирует, что результаты исследования, изложенные в рукописи, представляют собой оригинальную самостоятельную работу, и не содержат некорректных заимствований и плагиата, которые могут быть выявлены в процессе.

Авторы несут ответственность за публикацию статей с признаками неэтичного поведения, плагиата, самоплагиата, самоцитирования, фальсификации, фабрикаций, искажения данных, ложного авторства, дублирования, конфликта интересов и обмана.

Принцип подтверждения источников. Автор(ы) обязуется правильно указывать научные и иные источники, которые он(и) использовал(и) в ходе исследования. В случае использования каких-либо частей чужих работ и/или заимствования утверждений другого автора(-ов) в рукописи должны быть указаны библиографические ссылки с указанием автора(-ов) первоисточника. Информация, полученная из сомнительных источников не должна использоваться при оформлении рукописи.

В случае, если у рецензентов, научного редактора, члена(-ов) редколлегии журнала возникают сомнения подлинности и достоверности результатов исследования, автор(-ы) должны предоставить дополнительные материалы для подтверждения результатов или фактов, приводимых в рукописи.

Исправление ошибок в процессе публикации. В случае выявления ошибок и неточностей в работе на любой стадии публикационного процесса авторы

обязуются в срочном порядке сообщить об этом научному редактору и оказать помощь в устранении или исправлении ошибки для публикации на сайте журнала соответствующей коррекции (Erratum или Corrigendum) с комментариями. В случае обнаружения грубых ошибок, которые невозможно исправить, автор(-ы) должен(-ны) отозвать рукопись/статью.

Принцип соблюдения публикационной этики. Авторы обязаны соблюдать этические нормы, связанные с критикой или замечаниями в отношении исследований, а также в отношении взаимодействия с редакцией по поводу рецензирования и публикации. Несоблюдение этических принципов авторами расценивается как грубое нарушение этики публикаций и дает основание для снятия рукописи с рецензирования и/или публикации.

Конфликт интересов

Конфликт интересов, по определению Комитета по публикационной этике (COPE), это конфликтные ситуации, в которых авторы, рецензенты или члены редколлегии имеют неявные интересы, способные повлиять на их суждения касательно публикуемого материала. Конфликт интересов появляется, когда имеются финансовые, личные или профессиональные условия, которые могут повлиять на научное суждение рецензента и членов редколлегии, и, как результат, на решение редколлегии относительно публикации рукописи.

Главный редактор, член редколлегии и рецензенты должны оповестить о потенциальном конфликте интересов, который может как-то повлиять на решение редакционной коллегии. Члены редколлегии должны отказаться от рассмотрения рукописи, если они состоят в каких-либо конкурентных отношениях, связанных с результатами исследования автора(-ов) рукописи, либо если существует иной конфликт интересов.

При подаче рукописи на рассмотрение в журнал, автор (-ы) заявляет о том, что в содержании рукописи указаны все источники финансирования исследования; также указывают, какие имеются коммерческие, финансовые, личные или профессиональные факторы, которые могли бы создать конфликт интересов в отношении поданной на рассмотрение рукописи. Автор(ы), в письме при наличии конфликта интересов, могут указать ученых, которые, по их мнению, не смогут объективно оценить их рукопись.

Рецензент не должен рассматривать рукописи, которые могут послужить причинами конфликта интересов, проистекающего из конкуренции, сотрудничества или других отношений с кем-либо из авторов, имеющих отношение к рукописи.

В случае наличия конфликта интересов с содержанием рукописи, ответственный секретарь должен известить об этом главного редактора, после чего рукопись передается другому рецензенту.

Существование конфликта интересов между участниками в процессе рассмотрения и рецензирования не значит, что рукопись будет отклонена.

Всем заинтересованным лицам необходимо, по мере возможности избегать возникновения конфликта интересов в любых вариациях на всех этапах публикации. В случае возникновения какого-либо конфликта интересов тот, кто обнаружил этот конфликт, должен незамедлительно оповестить об этом редакцию. То же самое касается любых других нарушений принципов, стандартов и норм публикационной и научной этики.

Неэтичное поведение

Неэтичным поведением считаются действия авторов, редакторов или издателя, в случае самостоятельного предоставления рецензии на собственные статьи, в случае договорного и ложного рецензирования, в условиях обращения к агентским услугам для публикации результатов научного исследования, лжеавторства, фальсификации и фабрикация результатов исследования, публикация недостоверных псевдо-научных текстов, передачи рукописи статей в другие издания без разрешения авторов, передачи материалов авторов третьим лицам, условия когда нарушены авторские права и принципы конфиденциальности редакционных процессов, в случае манипуляции с цитированием, плагиатом.

Инструкция по отзыву или исправлению статей

Отзыв, исправление статей, извинения, опровержения осуществляется в соответствии с публикационной этикой.

Отзыв текста от публикации – механизм исправления опубликованной информации и оповещения читателей о том, что публикация содержит серьезные недостатки или ошибочные данные, которым нельзя доверять. Недостоверность данных может являться результатом добросовестного заблуждения или осознанных нарушений. Основной целью отзыва является исправление опубликованной информации, и обеспечить её цельность, а не наказать авторов, совершивших нарушения.

Теруге 13.03.2026 ж. жіберілді. Басуға 31.03.2026 ж. қол қойылды.

Электронды баспа

28.54 Мб RAM

Шартты баспа табағы 22,2. Таралымы 300 дана. Бағасы келісім бойынша.

Компьютерде беттеген: А. К. Мыржикова

Корректор: А. Р. Омарова, Д. А. Кожас

Тапсырыс № 4523

Сдано в набор 13.03.2026 г. Подписано в печать 31.03.2023 г.

Электронное издание

28.54 Мб RAM

Усл. печ. л. 22,2. Тираж 300 экз. Цена договорная.

Компьютерная верстка: А. К. Мыржикова

Корректор: А. Р. Омарова, Д. А. Кожас

Заказ № 4523

«Toraighyrov University» баспасынан басылып шығарылған

Торайғыров университеті

140008, Павлодар қ., Ломов к., 64, 137 каб.

«Toraighyrov University» баспасы

Торайғыров университеті

140008, Павлодар қ., Ломов к., 64, 137 каб.

67-36-69

E-mail: kereku@tou.edu.kz

www.vestnik-energy.tou.edu.kz