

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 (2025)

ПАВЛОДАР

**НАУЧНЫЙ ЖУРНАЛ**  
Вестник Торайғыров университета

Энергетическая серия  
выходит 4 раза в год

**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/>

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.,	<i>д.т.н., профессор</i>
Никифоров А. С.,	<i>д.т.н., профессор</i>
Новожилов А. Н.,	<i>д.т.н., профессор</i>
Никитин К. И.,	<i>д.т.н., профессор (Российская Федерация)</i>
Алиферов А. И.,	<i>д.т.н., профессор (Российская Федерация)</i>
Кошеков К. Т.,	<i>д.т.н., профессор</i>
Приходько Е. В.,	<i>к.т.н., профессор</i>
Кислов А. П.,	<i>к.т.н., доцент</i>
Нефтисов А. В.,	<i>доктор PhD</i>
Омарова А. Р.	<i>технический редактор</i>

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 Торайғыров университета» обязательна

**МАЗМҰНЫ**  
**СОДЕРЖАНИЕ**  
**CONTENT**

<b>Ауезханов Д. А., Сарсикеев Е. Ж., Мехтиев А. Д.</b> Оптические методы контроля качества плодов и овощей .....	6
<b>Баденова Ж. Р., Ердыбаева Н. К., Акаев А. М.</b> Разработка и оптимизация интеллектуальных систем управления тепловыми сетями на основе алгоритмов машинного обучения .....	15
<b>Бекбаев К.С., Кабулов Б. Б., Абдилова Г. Б., Орынбеков Д. Р., Болкенов Б. Т.</b> Современные методы первичной обработки лигноцеллюлозного сырья для производства биотоплива .....	27
<b>Бекбауов Б. Б., Арыстанбаев К. Е., Джаналиев Б. М.</b> Аддитивті модель бойынша оқу орындарын электрлік энергиясымен тұтынуын талдау және болжау .....	38
<b>Генбач А. А., Бондарцев Д. Ю.</b> Исследование теплообмена в покрытиях из крепких минеральных сред .....	51
<b>Ергалиев А. Б., Ярославцев М. В., Талипов О. М., Н. А. Қалы, Сагинов А. Г.</b> Повышение энергетической эффективности электропривода насоса нефтеперекачивающей станции при использовании частотного регулирования скорости .....	64
<b>Ергалиева А. Т., Авдеев Л. А., Телбаева Ш. З., Войткевич С. В., Иванов В. А.</b> Влияние солнечной активности на эффективность солнечных панелей в различных регионах Казахстана .....	77
<b>Есмаханова Л. Н., Шукманов Ж. Е., Сағындық Ә. Б., Исабекова Б. Б., Исабеков Ж. Б.</b> P1c негізіндегі қысқа тұйықталған роторы бар асинхронды қозғалтқышты басқару жүйелері .....	90
<b>Жалмагамбетова У., Нефтисов А., Шимпф А., Кислов А., Крылбаева М.</b> Проектирование систем передачи информации для автоматизированного экологического мониторинга .....	108
<b>Жумадилова А. К.</b> Реализация защиты от однофазного замыкания на землю с автоматическим изменением уставки тока .....	121
<b>Жумагулов М. Г., Әмірбаева А. Ә.</b> Обзор технологий газификации угля и их применимость в условиях казахстана. Часть 1 .....	132

<b>Жұмағұлов Т. Ж., Танжариков П. А., Елеуова Э. Ш., Жабағиев А. М., Назаров Е. А.</b> Брикеттеудің тиімді технологиялары: энергетикада өндіріс қалдықтарын пайдалану .....	147
<b>Ибрагимова С. В., Неберекутина Н. С., Сарсенбаева Г. А.</b> Құрамында көміртегі бар материалдардың электрофизикалық қасиеттерінің белсендірілген көмірді алу процесінің параметрлеріне әсері .....	161
<b>Икрам Ж. А., Омаров Б. С., Смайлов Н. К.</b> Двухдоменный подход к обнаружению поддельных лиц .....	175
<b>Кенбай А. А., Алдияров А. У., Ережеп Д. Е.</b> Криогенная установка для ftiг-спектроскопического исследования поведения углеводородных соединений при атмосферном давлении .....	188
<b>Kulikov A. P., Kaverin V. V., Zyuzev A. M., Druzhinin V. M.</b> Modeling of an induction motor driven by a frequency converter .....	201
<b>Кутпанова З. А., Кожахметова Д. О., Шандронов Д. Н., Байсеитов Г. Н., Оспанов Е. А.</b> Проектирование маршрута для мульти бпла доставки полезных грузов в экстренных ситуациях .....	216
<b>Markovsky V. P., Koshkin I. V., Utegulov A. B., Uspanova A. I., Pushkarev S. D.</b> Feasibility of using production waste at a machine-building enterprise for energy production .....	234
<b>Новожилов А. Н., Анарбаев А. Е., Новожилов Т. А.</b> Методы диагностики подшипников качения главного вала ветроэнергетической установки .....	252
<b>Онгар Б., Жуматова А. А., Дүйсенбек Ж. С., Баянбаев К. А.</b> Шағын гидроэлектростанцияларды қолданудың жаңа әдістері және синхронды генераторларды талдауды кеңейту .....	262
<b>Приходько Е. В., Никифоров А. С., Арипова Н. М., Кинжибекова А. К., Карманов А. Е.</b> Влияние эксплуатационных факторов на характеристики огнеупоров высокотемпературных агрегатов .....	274
<b>Расмухаметова А. С., Ергали М. А., Олжабаева К. С., Мустағұлова Б. Ж.</b> Жаңартылатын энергия көздерінің интеграциясы үшін энергияны жинақтау жүйелеріне салыстырмалы талдау .....	285
<b>Рустамов Н. Т., Меирбекова О. Д., Бабахан Ш. А., Бергузинов А. Н., Калтаев А. Г.</b> Жылу және электр энергиясын өндіруге арналған таратылған энергетикалық жүйе .....	300
<b>Sarsembayev B., Mubarak A., Arinova A. Kalimuldina G.</b> Evaluating structure and power converting circuits for hybrid triboelectric and piezoelectric nanogenerator .....	314

<b>Сейдулла Ж. Қ., Исатаев М. С., Манатбаев Р. Қ., Ершина А. Қ., Додаев С.</b> Тік осьті жел қондырғысына арналған симметриялы емес пішінді қалақшалардың аэродинамикасын зерттеу .....	330
<b>Сыдықова Г. К., Құлтан И. Б., Акбаров Д., Айтуғанова А. М.</b> Қазақстан мен өзбекстанда жаңартылатын энергия көздерін дамытудың әлеуеті мен перспективалары .....	344
<b>Шерьязов С. К., Тайманов С. Т., Мұхамбетжан А. М., Ауесхан А. А.</b> Күн батареяларының энергетикалық Көрсеткіштерін модельдеу .....	357
<b>Шоланов К. С., Жакипов Н. Б., Асаинов Г. Ж.</b> Энергия ветровой нагрузки воспринимаемая актуаторами парусной ветровой электростанции .....	373
<b>Юсупова Ә. О., Потапенко А. О., Рахимбердинова Д. М., Колесников Е. Н.</b> Өлшеу түрлендіргішінің электр сыйымдылығын модельдеу .....	384
Авторлар туралы ақпарат	
Сведения об авторах Information about the authors .....	396
Авторларға арналған ережелер Правила для авторов Rules for authors .....	424
Жарияланым этикасы Публикационная этика Publication ethics .....	435

<https://doi.org/>

**\*Д. А. Ауезханов<sup>1</sup>, Е. Ж. Сарсикеев<sup>2</sup>, А. Д. Мехтисев<sup>3</sup>**

<sup>1,2,3</sup>Казахский агротехнический исследовательский университет имени

С. Сейфуллина, Республика Казахстан, г. Астана

<sup>1</sup>ORCID: <https://orcid.org/0009-0006-4164-1033>

<sup>2</sup>ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-7209-5024>

<sup>3</sup>ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-2633-3976>

\*e-mail: [daueyzkhanov@gmail.com](mailto:daueyzkhanov@gmail.com)

## **ОПТИЧЕСКИЕ МЕТОДЫ КОНТРОЛЯ КАЧЕСТВА ПЛОДОВ И ОВОЩЕЙ**

*В обзорной статье рассматриваются современные технологии сортировки плодов и овощей с использованием оптических методов. Сортировка сельскохозяйственной продукции имеет решающее значение для сохранения их качества и конкурентоспособности на рынке, для повышения продовольственного оборота. В обзоре рассматриваются современные тенденции и достижения в оптической сортировке. Обзор включает основные методы и их применение в реальном производстве. В обзоре показано влияние оптических методов на повышение устойчивости сельскохозяйственных процессов и снижение потерь продукции. Обоснованы преимущества, определены проблемы и перспективы использования этой технологии в сельском хозяйстве. В статье рассматриваются новейшие достижения в этой области, анализируются практические примеры внедрения технологий в производство, а также обсуждаются их преимущества, проведены классификация методов разработанных решений. Данный обзор может быть полезным для исследователей, инженеров и производителей, которые хотят узнать больше об использовании оптических методов в процессах сортировки овощей и плодов.*

*Ключевые слова: сортировка, оптический анализ, оптические методы, плоды и овощи, сортировка плодов, качество продукции*

### **Введение**

На сегодняшний день аграрная промышленность является одним из главных источников доходов во многих странах. Благодаря развитию

технологий аграрная промышленность развивается каждый день. С помощью этих технологий стало возможным автоматизировать многие процессы, но возникла проблема с сортировкой сельскохозяйственных продуктов по их качеству. На сегодняшний день несколько предлагаются различные технологии с использованием оптических методов для сортировки плодов и овощей. В данной обзорной статье рассматриваются современные решения, которые предлагают свои технологии для сортировки продуктов и научные статьи, которые описывают современные решения данной проблемы.

### **Материалы и методы**

Проведен анализ научных статей от всемирно признанных изданий Scopus и Google Scholar. Анализ заключается в следующем, были отобраны статьи объединенной общей тематикой и направлением исследования. Из выбранного массива была сделана классификация для разделение по тематическим направлениям. Это позволило подготовить определенный задел для получения первичной информации который будет использован в данном обзоре.

Оценка качества овощей производится с использованием неразрушающих методов, которые являются одними из самых основных тем в сельскохозяйственном производстве. В работе отражены некоторые проблемы с оценкой качества и отразили собственные результаты исследования по данной теме [1, с. 323-379]. Здесь же имеется информация, посвященная методам контроля качества и оценке характеристик плодов. В исследовании использовались оптические методы для распознавания зрелости и спелости овощей, разработка сортировочной машины для онлайн измерения качества, что не отражает полноты картины качества тестируемых овощей.

На сегодняшний день одной из самых популярных форм исследования повреждений картофеля является использование оптических методов. Для этого используются оптический метод, который фотографирует кожу картофеля и обрабатывает изображение под разными углами. После этого изображение сравнивается с базой данных на наличие заболеваний и повреждение на картофеле. В заключение по результатам исследования авторы утверждают что точность поиска дефектов составляет 93,1%. В статье [2, с. 1188] проводятся исследование для автоматизации работы по поиске дефектов, что позволит повысить точность распознавания и уберет человеческие фактор во время сортировки.

Процесс исследования различные оптических и механических методов для измерения твердости сельскохозяйственных продуктов был проведен в статье [3, с. 4009-4039]. В исследовании провели множества исследования множественными методами, к которым относится спектроскопии видимого/ближнего инфракрасного диапазона (Vis/NIR), гиперспектральной

или мультиспектральной визуализации (HIS/MSI) и другие, а также виды механических методов, включая несколько методов, таких как микродеформация, измерения вибрации, реакция на акустический удар, удар при падении, удар молотком и ультразвуковые методы. В данной статье подробно обсуждаются фундаментальные принципы, а также измеренные характеристики механических и оптических методов измерения твердости фруктов. Результаты исследования восполняют недостаток знания в области распознавания с использованием оптических и механических методов.

Исследование в области сортировки с помощью компьютерного зрения проводится очень давно. С помощью данного исследования показываются ценность машинного обучения для сферы питания. Так же в данной статье подмечаются о полезности распознавания продуктов для здорового образа жизни, по причине возможности машинного обучения для анализа продуктов пищевой ценности и безопасности пищевых продуктов, так же для подсчета калорий, белков, углеводов и других. Одной из главных проблем которых описываются в статье является создание точной и надежной системы, по причине невозможности распознавания качества продуктов на основе изображения [4, с. 323-379].

Имеется публикация, посвященная опыту использования мобильных для распознавания продовольственных продуктов и подсчета калорий, углеводов и других рассматривается в статье [5, с. 59]. Благодаря характеристикам мобильных камер производится подсчет калорий, углеводов и других свойств продуктов. В работе подмечаются доступность данной технологии по причине массовости распространения смартфонов функции, которых позволяет выполнять множества различных операции. Одной из главных проблем в данном исследовании, которая выделили сами авторы является недоверия к компьютерному зрению и отсутствие объяснения того, как они получают свои классификации или оценки объема и теплотворной способности. Данное исследование, как и любое связанное с развитием смартфонов, имеет огромную полезность, благодаря их популярности.

Исследования в области оптических методов диагностики зрелости и качества плодоовощной продукции представлены в статье [6, с. 123-130], где авторы изложили различные оптические методы и показали их преимущества и недостатки. В данной работе рассмотрены основные проблемы оптических методов, к которым можно отнести невысокая точность распознавания и низкая вероятность успеха обнаружение дефектов. В данной статье, описывают все основные аспекты связанные с тематикой распознавания с помощью оптических методов, что позволит расширить область знания в сфере компьютеров зрения.

Имеются сведения о безопасности и качестве пищевых продуктов, описываются оптические методы, с помощью которых обнаруживаются различные загрязнения на сельскохозяйственных продуктах. В статье представляются несколько научных исследований, связанные с загрязнением и повреждением фруктов и овощей, а также фиксации различных заболеваний. Также описываются недостатки и преимущества оптического зондирования для анализа повреждений. Исследования могут быть использованы для повышения безопасности и здоровья человека, с помощью распознавание различных бактерий и заболеваний используя оптические методы [7, с. 121-167].

Статья [8, с. 315-326] посвящена сортировке яблок с использованием оптического модуля и нейронной сети. В работе отражены исследованием с использованием оптико-электронной системы и проводимых испытаниях. Одной из проблем показанных в исследовании является неспособность существующих машин для сортировки яблок по их характеристикам. Исследование в области сортировки яблок и других продуктов пользующимся популярностью у население, поможет обеспечить высокое качество продукции которое будет продаваться людям.

В статье [9] показаны исследование оливок с помощью распознавания дефектов с помощью алгоритмов искусственного интеллекта для распределения их по качеству. Предлагаемые методы использовались во время их эксперимента, в котором использовался образец имеющий раму из алюминия, для обеспечения перекрытия изображения и избежания потери информации. В исследовании использовались движущаяся конвейерная лента с компактной камерой RGB. Созданное устройство можно увидеть на рисунке 2. В работе подмечается, что данное исследование нуждается в оптимизации и модернизации программной части. Результаты имеют большой потенциал в сфере изготовления оливкового масла, что позволит оптимизировать работу сортировки и поиска дефектов во время отбора оливок для изготовления.

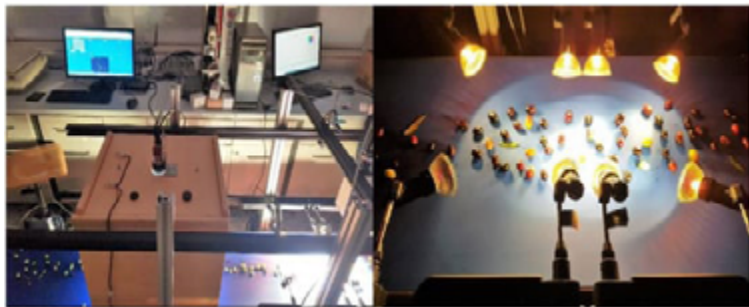


Рисунок 1 – Пилотный конвейер, используемый для отбора оливок

Одним из направлений развития методов оценки качества, является автоматизированная система по распознаванию различных продуктов по их цвету [10, с. 573-579]. Авторы дают описание наиболее популярных и действенных методов, таких как распознавания с помощью оптического датчика для определения световых волн и изменение цвета продукта по черно белому изображению. Здесь же можно найти информацию по изучению высокоскоростной системы автоматизированной системы машинного обучения, разработанной на основе системы распознавания в реальном времени IDAS. В заключение авторы подмечают несколько проблем, такими как отсутствие информации о цвете и плохого качества изображения. В данной статье описываются не только исследования, но и описание конфигурации всех оборудование которые использовались в эксперименте, что поможет в дальнейшем в улучшении и оптимизации всех процессов.

Развитие искусственного интеллекта и использования его в сфере распознавания и определение внешних дефектов и повреждении у плодов оливок было подробно рассмотрено в статье [11, с. 894-898]. Здесь представлен способ работы искусственного интеллекта, который был разработан с целью обнаружение внешних дефектов. Так же были подробно объяснены принцип работы данного метода и расписан процесс исследования. Предложенный алгоритм может быть встроен в сортировочную машину и улучшить сортировочной процесс оливок на заводе. Использование искусственного интеллекта в сортировке оливок и других продуктов имеет огромный потенциал, благодаря высокой точности отбора и экономии денежных средств.

Исследование в области автоматизации сортировочной работы с проверкой на дефекты и без разрушение качества всегда уделялось большое внимание. В статье [12, с. 213-231] представляются исследования оптических систем контроля качества для фруктов и овощей. В исследовании уделялось большое внимание к определению основных характеристик плодов, таких

как цвета, размеры, формы, дефекты и зрелость. Также большое внимание уделяется исследованию уже существующих решения в области оптического сканирования. В заключение исследование описывает существующие методы и их дальнейшее развитие в этой области.

Процесс сортировки плодов и овощей имеет огромное значение в пост сборочной обработке, поскольку определяет качество продукции и ее рыночную стоимость. В последние годы благодаря развитию роботизированных систем сортировки, оснащенных оптическими лазерами, предложило более быструю и безошибочную систему. Исследование в статье [13] рассматривает существующие и рабочие методы оптической сортировки с применением дополнительных методов, такими как фьюжн датчики, машинное обучение и адаптивных решения сортировки. Согласно заключению авторов, исследование имеет потенциал в области сортировки, но требует решения различных технических и практических проблем.

#### **Результаты и обсуждения**

Обзорная статья охватывает современные технологии сортировки и оценки качества сельскохозяйственной продукции, такие как спектроскопия видимого и ближнего инфракрасного диапазонов (VIS/NIR), гиперспектральная и мультиспектральная визуализация, а также использование оптико-электронных систем и машинного обучения. Приводятся ряд практических примеров, описывают преимущества и недостатки каждого из методов, а также выявляют основные вызовы и перспективы их использования в реальных производственных условиях.

Таким образом, статья делает вклад в развитие знаний об оптических методах, применимых в сельскохозяйственном производстве, и может служить основой для исследователей и производителей, заинтересованных во внедрении этих технологий для повышения качества плодоовощной продукции.

#### **Выводы**

В заключение, обзорная статья предоставила подробный обзор современных оптических методов сортировки плодов и овощей. Оптическая сортировка - мощный инструмент для обеспечения высококачественной продукции, оптимизации производственных процессов и повышения конкурентоспособности на рынке. В обзорной статье были рассмотрены основные методы оптической сортировки, а также выявлены преимущества и недостатки. Были также рассмотрены проблемы, с которыми сталкиваются разработчики и производители при использовании данной технологии. Несмотря на значительные достижения в этой области, существует множество проблем, которые требуют дополнительных исследований и

инноваций. Оптическая сортировка плодов и овощей обещает улучшить эффективность и точность процессов сортировки.

#### СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1 **Deshpande, S. S. et al.** Nondestructive optical methods of food quality evaluation //Critical Reviews in Food Science & Nutrition. – 1984. – Т. 21. – №. 4. – С. 323-379.

2 **Dorokhov, A. et al.** Development of an Optical System with an Orientation Module to Detect Surface Damage to Potato Tubers //Agriculture. – 2023. – Т. 13. – №. 6. – P. 1188.

3 **Tian, S., Xu, H.** Mechanical-based and optical-based methods for nondestructive evaluation of fruit firmness //Food Reviews International. – 2023. – Т. 39. – №. 7. – P. 4009-4039.

4 **Deshpande, S. S., Cheryan, M., Luh, B. S.** «Nondestructive Optical Methods of Food Quality Evaluation.» Critical Reviews in Food Science & Nutrition, vol. 21, No. 4, 1984, P. 323-379.

5 **Amugongo, L. M. et al.** Mobile computer vision-based applications for food recognition and volume and calorific estimation: A systematic review // Healthcare. – MDPI, 2022. – Т. 11. – №. 1. – P. 59.

6 **Ivanov, A. V., Petrov, B. N.** «Optical Methods for Assessing the Ripeness and Quality of Fruits and Vegetables.» Journal of Agricultural Sciences, vol. 15, no. 2, 2020, P. 123-130.

7 **Ng, P. C., Khor, S. M.** Optical Detection of Targets for Food Quality Assessment //Biosensing and Micro-Nano Devices: Design Aspects and Implementation in Food Industries. – Singapore : Springer Nature Singapore, 2022. – P. 121-167.

8 **Kazakievich, P. et al.** Optical-Electronic System for Apple Sorting Line: Development and Implementation //International Conference on Agriculture Digitalization and Organic Production. – Singapore : Springer Nature Singapore, 2023. – С. 315-326.

9 **Figorilli, S. et al.** Olive fruit selection through ai algorithms and RGB imaging //Foods. – 2022. – Т. 11. – №. 21. – С. 3391.

10 **Lee, D. J., Anbalagan, R. S.** High-speed automated color-sorting vision system //Optical Engineering Midwest'95. – SPIE, 1995. – Т. 2622. – P. 573-579.

11 **Guzmán, E. et al.** Infrared machine vision system for the automatic detection of olive fruit quality //Talanta. – 2013. – Т. 116. – С. 894-898.

12 **Zhang, B. et al.** Challenges and solutions of optical-based nondestructive quality inspection for robotic fruit and vegetable grading systems: A technical review //Trends in food science & technology. – 2018. – Т. 81. – P. 213-231.

13 **Lu, R. et al.** Measurement of optical properties of fruits and vegetables: A review //Postharvest Biology and Technology. – 2020. – Т. 159. – P. 111003.

Поступило в редакцию 20.05.24

Поступило с исправлениями 26.11.24

Принято в печать 01.09.24

\*Д. А. Ауезханов<sup>1</sup>, Е. Ж. Сарсикеев<sup>2</sup>, А. Д. Мехтиеv<sup>3</sup>

<sup>1,2,3</sup>С. Сейфуллин атындағы Қазақ агротехникалық зерттеу университеті,

Қазақстан Республикасы, Астана қ.

20.05.24 ж. баспаға түсті.

26.11.24 ж. түзетулерімен түсті.

10.03.25 ж. басып шығаруға қабылданды.

#### АУЫЛ ШАРУАШЫЛЫҒЫНДАҒЫ ОПТИКАЛЫҚ ТЕХНОЛОГИЯЛАР

*Шолу мақаласында оптикалық әдістерді қолдану арқылы жемістер мен көкөністерді сұрыптаудың заманауи әдістері қарастырылады. Ауыл шаруашылығын бағалау олардың сапасы мен нарықтағы бәсекеге қабілеттілігін сақтау үшін өте маңызды. Дәлдігі, жылдамдығы және бұзылмайтындығына байланысты оптикалық әдістер ауыл шаруашылығында барған сайын танымал бола бастады. Бұл шолу оптикалық сұрыптаудағы соңғы трендтер мен жетістіктерді қарастырады. Шолу негізгі әдістерді және олардың нақты өндірісте қалай қолданылатынын қамтиды. Шолу сонымен қатар ауылшаруашылық процестерінің тұрақтылығын арттыруға және өнімнің жоғалуын азайтуға оптикалық әдістердің әсеріне назар аударады. Бұл технологияны ауыл шаруашылығында қолданудың артықшылықтары, қиындықтары мен келешегі басты назарда. Мақалада осы саладағы соңғы жаңалықтар қарастырылады, технологияны өндіріске енгізудің практикалық мысалдары талданады және оның жоғары тиімділік, автоматтандыру және көптеген параметрлер бойынша сұрыптау мүмкіндігі сияқты артықшылықтары мен кемшіліктері, соның ішінде жабдықтың жоғары құны және күрделі калибрлеу қажеттілігі. Бұл шолу көкөністер мен жемістерді сұрыптау процестерінде оптикалық әдістерді қолдану туралы көбірек білгісі келетін зерттеушілер, инженерлер және өндірушілер үшін пайдалы болуы мүмкін.*

*Кілтті сөздер: сұрыптау, оптикалық талдау, оптикалық әдістер, жемістер мен көкөністер, жемістерді сұрыптау, өнім сапасы*

\*D. A. Auezkhanov<sup>1</sup>, E. Zh. Sarsikeev<sup>2</sup>, A. D. Mehdiev<sup>3</sup>  
<sup>1,2,3</sup> S. Seifullin Kazakh Agro Technical Research University,  
Republic of Kazakhstan, Astana  
Received 20.05.24  
Received in revised form 26.11.24  
Accepted for publication 10.03.25

## OPTICAL TECHNOLOGIES IN THE AGRICULTURAL INDUSTRY

*This review article discusses modern methods of fruit and vegetable sorting using optical methods. Agricultural sorting is crucial to maintain their quality and competitiveness in the market. Due to their accuracy, speed and non-destructiveness, optical methods are becoming increasingly popular in agriculture. The review examines the latest trends and achievements in optical sorting. The review includes the main methods and how they are used in real production. The review also focuses on the impact of optical methods on increasing the sustainability of agricultural processes and reducing product losses. The main focus is on the advantages, challenges and prospects of using this technology in agriculture. The article examines the latest advances in this field, analyzes practical examples of the implementation of technologies in production, and discusses their advantages, such as high efficiency, automation and the ability to sort by several parameters, and disadvantages, including high equipment cost and the need for complex calibration. This review may be useful for researchers, engineers and producers who want to learn more about the use of optical methods in fruit and vegetable sorting processes.*

*Key words: sorting, optical analysis, optical methods, fruits and vegetables, fruit sorting, product quality*

МРНТИ 44.31.35

<https://doi.org/>

**\*Ж. Р.Баденова<sup>1</sup>, Н. К.Ердыбаева<sup>2</sup>, А. М. Акеев<sup>3</sup>**

<sup>1,2,3</sup>Восточно-Казахстанский технический университет  
имени Д. Серикбаева, Республика Казахстан, г. Усть-Каменогорск  
<sup>1</sup>ORCID: <https://orcid.org/0009-0002-7326-1714>  
<sup>2</sup>ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-0314-0503>  
<sup>3</sup>ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-9390-5703>  
\*e-mail: [janara1993m@mail.ru](mailto:janara1993m@mail.ru)

## РАЗРАБОТКА И ОПТИМИЗАЦИЯ ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНЫХ СИСТЕМ УПРАВЛЕНИЯ ТЕПЛОВЫМИ СЕТЯМИ НА ОСНОВЕ АЛГОРИТМОВ МАШИННОГО ОБУЧЕНИЯ

*В статье рассматриваются современные подходы к разработке и оптимизации интеллектуальных систем управления тепловыми сетями с целью повышения энергоэффективности. В условиях роста потребления энергии и усиления требований по сокращению углеродного следа эффективное управление тепловыми сетями становится необходимостью. Для решения этой проблемы предлагается использование инновационных технологий, таких как алгоритмы машинного обучения и анализ больших данных, которые позволяют более точно прогнозировать потребности в тепле и оптимизировать распределение тепловых ресурсов. Целью исследования является разработка интеллектуальной системы управления, способной оптимизировать распределение тепла в тепловых сетях с учетом динамических изменений потребности в энергии. В статье представлен анализ существующих технологий управления тепловыми сетями, выявлены их недостатки, такие как высокая централизованность управления и недостаточная гибкость в реагировании на изменения потребностей.*

*Методология исследования включает описание архитектуры системы, основанной на интеграции сенсоров, контроллеров и вычислительных мощностей для сбора данных о состоянии сети в реальном времени. Прогнозирование потребления тепла осуществляется с помощью алгоритмов машинного обучения,*



*включая регрессионные модели, нейронные сети и методы временных рядов, что позволяет учитывать различные факторы, влияющие на потребление тепла.*

*Ключевые слова: интеллектуальные системы, управление тепловыми сетями, энергоэффективность, оптимизация процессов, автоматизация, машинное обучение, интернет вещей.*

## Введение

Интеллектуальные информационные системы (ИС) стали неотъемлемой частью автоматизации и управления сложными объектами благодаря использованию искусственного интеллекта (ИИ). Они основываются на теоретических достижениях кибернетики, алгоритмов, современных информационных технологий, накопленных знаниях и машинного обучения. ИС способны решать задачи с неопределёнными данными, адаптироваться и учиться, что делает их гибкими и применимыми в условиях неопределённости.

Статья [1, с. 65-83] посвящена анализу текущего состояния и перспектив развития систем централизованного теплоснабжения (СЦТ) в контексте их цифровизации и интеллектуализации. Выделены ключевые направления, такие как математическое моделирование режимов, идентификация фактического состояния систем по данным измерений, оптимизация режимов работы и разработка соответствующего программного обеспечения. Представлен аналитический обзор современных научно-методических разработок в области моделирования гидравлических, температурных и теплогидравлических режимов СЦТ. Обсуждаются методы оптимизации режимов работы для повышения энергоэффективности и надежности систем.

Данная статья представляет собой ценный обзор текущего состояния и перспектив интеллектуализации СЦТ, и предполагает направления для дальнейших исследований и практических разработок в области IoT и машинного обучения.

В статье [2, с. 430] подчеркивается важность управления энергопотреблением в умных домах для достижения устойчивого развития. Интеграция систем управления домашней энергией (HEMS) с технологиями машинного обучения (ML) позволяет значительно улучшить энергоэффективность, сократить расходы и минимизировать воздействие на окружающую среду. Работа [2, с. 430] основана на многомерной архитектуре LSTM для прогнозирования энергопотребления.

Авторы сравнили несколько моделей: ARIMA, SARIMAX, авто-ARIMA и LSTM. Модель LSTM показала лучшие результаты: MSE: 0.02284 (минимальная среднеквадратическая ошибка); RMSE: 0.15113; MAE: 0.123;

$R^2: 0.694$ , [2, с. 430]. Исследование подтверждает, что использование технологий ML в умных домах позволяет существенно повысить точность прогнозирования энергопотребления. Применение LSTM моделей способствует сокращению энергопотерь и повышению устойчивости энергосистем.

Роль технологий Интернета вещей (IoT) и машинного обучения (ML) в создании умных городов, ориентированных на сбор, обработку и использование данных рассматриваются в статье [3, с. 1607–1637]. Здесь были изучены проблемы внедрения, такие как защита данных и конфиденциальность, проблемы безопасности и устойчивости сетей, этические аспекты автоматизации решений, недостаток квалифицированных кадров и сложность межсекторного сотрудничества и кейсы успешного внедрения.

В [3, с. 1607–1637] прогнозируются будущие исследования по разработке новых алгоритмов обработки данных и аналитических инструментов, по оптимизации методов интеграции IoT-устройств и ML-систем, и по исследованию гибридных систем хранения данных и вычислительных платформ. В недавней литературе методы машинного обучения (ML), а в последнее время и методы глубокого обучения (DL) использовались в нескольких исследованиях для реализации мер противодействия кибератакам в SG-CPS, [4, с. 1268-1290]. Тем не менее, достижение высокой производительности этих современных методов ограничивается определенными проблемами, включая оптимизацию гиперпараметров, извлечение и выбор признаков, отсутствие прозрачности моделей, конфиденциальность данных и отсутствие данных об атаках в режиме реального времени. В статье [4, с. 1268-1290] рассматривается прогресс в использовании методов ML и DL для мер противодействия кибербезопасности в SG-CPS. В литературе [4, с. 1268-1290] анализируются ограничения, которые необходимо устранить для повышения производительности и достижения внедрения в реальном времени. Также обсуждаются различные типы кибератак, требования кибербезопасности, стандарты и протоколы безопасности для создания всестороннего понимания контекста кибербезопасности в SG-CPS.

Авторы [5, с. 3654–3670] тщательно разбирают современные модели глубокого обучения, включая нейронные сети и ансамблевые методы, и оценивает их эффективность с помощью подробного обзора алгоритмов и фреймворков. Раздел методологии систематически сравнивает эти методы с традиционными методами прогнозирования с использованием показателей производительности, таких как MAPE, RMSE и MSE, обеспечивая всестороннюю оценку их точности и масштабируемости. Значительным

вкладом в литературе [5, с. 3654–3670] является рассмотрение реальных приложений и тематических исследований, которые демонстрируют, как методы ML и DL решают практические проблемы в управлении энергией, такие как стабильность сети и прогнозирование спроса. Кроме того, обзор представляет новые перспективы интеграции вероятностного прогнозирования и ансамблевых методов, которые предлагают инновационные подходы к управлению неопределенностями спроса на энергию. Выявляя текущие ограничения и предлагая будущие направления исследований, этот обзор не только способствует пониманию приложений DL и ML в интеллектуальных сетях, но и обеспечивает основу для будущих разработок в этой развивающейся области.

В [6, с. 1235–1253] авторы предлагают основанную на машинном обучении стекированную структуру для обнаружения вредоносной активности в интеллектуальной сети. Предлагаемая основанная на данных стекированная ансамблевая модель обнаруживает честных и аномальных потребителей в два этапа. Результаты моделирования показывают, что предлагаемая структура повысила энергетическую безопасность и преодолевает влияние краж на интеллектуальную сеть, что важно при разработке и оптимизации интеллектуальных систем управления тепловыми сетями на основе алгоритмов машинного обучения.

Статья [7, с. 108304] исследует применение методов машинного обучения (ML) и техник балансировки данных для оценки стабильности интеллектуальных энергосетей. Для обучения ML-моделей необходимы сбалансированные данные. Статья предлагает подходы к оценке стабильности сети с использованием ML и сбалансированных данных, что позволяет своевременно выявлять потенциальные риски и принимать превентивные меры. В [7, с. 108304] приведены примеры успешного применения предложенных методов в реальных энергосистемах, демонстрируя их эффективность в повышении стабильности и надежности сетей.

В [8, с. 100856] работе авторы приходят к выводу, что применение AI и ML в V2G-технологиях открывает новые возможности для повышения эффективности и устойчивости энергосистем. А авторы научной статьи [9, с. 100945] предлагают уникальный метод обнаружения неисправностей в интеллектуальных энергосетях, основанный на мониторинге данных и их классификации с использованием нечеткой модели машинного обучения. Для отслеживания данных из интеллектуальной сети используется улучшенное интеллектуальное сенсорное измерение, выполняемое в облаке на периферии сети. Затем для классификации отслеживаемых данных применяется нечеткая модель машинного обучения. Предложенная методика в [9, с. 100945] литературе достигла следующих показателей: точность - 93%,

пропускная способность - 94%, надежность - 81%, средняя точность: 89%, масштабируемость - 92%. На основании результатов экспериментального анализа, авторы приходят к выводу, что улучшенные технологии мониторинга и предсказательные методы могут повысить потенциал использования текущей сети и снизить частоту неисправностей.

Анализ представленных научных работ демонстрирует, что машинное обучение (ML), искусственный интеллект (AI) и технологии Интернета вещей (IoT) занимают особое место в разработке интеллектуальных систем управления различными компонентами энергосетей, включая тепловые сети.

В отечественной литературе имеются работы, посвященные интеллектуальным системам управления тепловыми сетями с использованием методов машинного обучения. Например, статья [10, с. 29–38] рассматривает применение нейронных сетей для прогнозирования и управления тепловыми нагрузками в городских системах теплоснабжения.

В Казахстане активно развиваются исследования в области применения машинного обучения и искусственного интеллекта в различных отраслях, включая энергетический сектор. Однако конкретных публикаций, посвященных интеллектуальным системам управления тепловыми сетями с использованием машинного обучения, в открытых источниках недостаточно. Тем не менее, в отечественных высших учебных заведениях и научно-исследовательских учреждениях ведутся работы, связанные с применением технологий машинного обучения в энергетике и смежных областях. Например, в Восточно-Казахстанском техническом университете им. Д. Серикбаева проводятся исследования по анализу данных и машинному обучению для различных приложений, [11]. Кроме того, в Казахстано-Британском техническом университете издается научный рецензируемый журнал, в котором публикуются статьи по актуальным вопросам информационных технологий и их применения в промышленности, [12, с. 28-41], [13, с. 56-68].

#### **Материалы и методы**

Система управления процессами тепловых электрических станций, тепловых сетей и связанных с ними объектов в Казахстане основана на следующих ключевых принципах и технологиях:

Автоматизация управления:

- применение систем управления на базе программируемых логических контроллеров (ПЛК), таких как Siemens S7, Schneider Electric, ABB и других;
- использование SCADA-систем (например, SIMATIC PCS7, TIA Portal) для мониторинга, управления и диспетчеризации технологических процессов.

Централизованный контроль и диспетчеризация:

- внедрение централизованных диспетчерских пунктов для управления объектами тепловых электростанций (ТЭС) и тепловых сетей;
- интеграция автоматизированных рабочих мест (АРМ) для операторов. Сетевые технологии и передача данных:
  - применение промышленных сетей передачи данных (Profinet, Modbus, Ethernet/IP);
  - использование распределенных систем управления (DCS) для комплексного управления производственными процессами.
- Системы безопасности и защиты:
  - внедрение аварийных систем сигнализации (ASU), защиты оборудования и предотвращения аварийных ситуаций;
  - резервирование оборудования для повышения надежности и минимизации сбоев.
- Интеграция информационных технологий:
  - использование технологий Интернета вещей (IoT) для удаленного мониторинга и управления;
  - применение больших данных (Big Data) и методов машинного обучения (ML) для анализа, прогнозирования и оптимизации режимов работы.

#### **Результаты и обсуждение**

В нашей работе мы хотим показать реконструкцию автоматизированной системы управления технологическим процессом (АСУ ТП) багерной насосной №3 на ТОО «Усть-Каменогорская ТЭЦ», которая демонстрирует современные подходы к автоматизации в энергетическом секторе. В проекте реализована двухуровневая архитектура с использованием резервированных контроллеров Siemens S7-410-5H, станций ввода-вывода ET200SP HA и сети Profinet для надежной передачи данных.

Основные достижения заключаются в обеспечении непрерывного мониторинга, управления и диагностики технологического процесса с использованием программного обеспечения SIMATIC PCS7. Важное значение имеет интеграция автоматизированных рабочих мест (АРМ), поддерживающих процессы управления, анализа и архивирования данных. Система удовлетворяет всем требованиям промышленной автоматизации, включая сбор и обработку данных в реальном времени, контроль технологических параметров, управление электроприводами и запорной арматурой, а также поддержку аварийных сигналов. Особое внимание уделено безопасности, обеспечению энергонезависимого хранения данных и резервированию питания. В перспективе возможно дальнейшее расширение функционала системы благодаря заложенным резервам модулей ввода-вывода, что позволит адаптировать систему к изменениям производственного процесса. Это делает предложенные решения устойчивыми и перспективными

в условиях модернизации энергетических объектов. Для обеспечения точности прогнозирования тепловой нагрузки целесообразно использовать модели временных рядов, включая LSTM, ARIMA и ансамблевые методы. Применение данных о погодных условиях, уровне нагрузки и фактическом потреблении тепловой энергии позволяет повысить достоверность прогнозов, обеспечивая адаптивное управление ресурсами.

Оптимизация управления тепловыми сетями достигается за счет внедрения методов обучения с подкреплением, направленных на динамическое регулирование температуры и потоков теплоносителя. Использование нечетких логических систем способствует эффективной работе сетей в условиях высокой степени неопределенности параметров.

Автоматическое обнаружение неисправностей возможно благодаря применению алгоритмов классификации и нечетких моделей машинного обучения. Это позволяет своевременно идентифицировать сбои в системе, прогнозировать аварийные ситуации и предотвращать тепловые потери, минимизируя эксплуатационные риски.

#### **Информация о финансировании**

Выражаем благодарность за предоставленную информацию по реконструкции АСУ ТП багерной насосной №3 в ТОО «Усть-Каменогорская ТЭЦ» ТОО «Синетик» города Усть-Каменогорск, а также АО «Усть-Каменогорские Тепловые сети».

#### **Выводы**

В результате проведенного анализа современных подходов к разработке и оптимизации интеллектуальных систем управления тепловыми сетями на основе алгоритмов машинного обучения были выделены ключевые направления, требующие дальнейшего научного изучения и технического развития. Установлено, что интеграция технологий машинного обучения и Интернета вещей (IoT) обеспечивает высокую точность прогнозирования тепловой нагрузки, оптимизацию управления энергопотоками, оперативное обнаружение неисправностей и повышение общей надежности системы.

Предложенные подходы обеспечивают повышение эффективности использования энергоресурсов, снижение эксплуатационных затрат и минимизацию воздействия на окружающую среду. Ожидается, что результаты исследования будут способствовать дальнейшему развитию умных городов и цифровой энергетической инфраструктуры.

#### **СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ**

1 Новицкий, Н. Н., Шалагинова, З. И., Алексеев, А. В., Токарев, В. В., Гребнева О. А., Луценко А. В., Вантеева О. В. Современное состояние,

тенденции и задачи интеллектуализации систем теплоснабжения (обзор) [Текст] // Теплоэнергетика. – 2022. – №5. – 65-83 с.

2 **Khan, M. A., Sabahat, Z., Farooq, M. S., Saleem, M., Abbas, S., Ahmad, M., Mazhar, T., Shahzad, T., Saeed, M. M.** Optimizing smart home energy management for sustainability using machine learning techniques [Текст]. Discover Sustainability. – 2024. – №5, 430 p.

3 **Ullah, A., Anwar, S. M., Li, J., Nadeem, L., Mahmood, T., Rehman, A., Saba, T.** Smart cities: the role of Internet of Things and machine learning in realizing a data-centric smart environment [Текст]. Complex & Intelligent Systems, – 2024. – 10: 1607–1637 p.

4 **Hasan, M. K., Abdulkadir, R. A., Islam, S., Gadekallu, T. R., Safie, N.** A review on machine learning techniques for secured cyber-physical systems in smart grid networks [Текст]. Energy Reports, – 2024. Volume 11. – 1268-1290 p.

5 **Biswal, B., Deb, S., Datta, S., Ustun, T. S., Cali U.** Review on smart grid load forecasting for smart energy management using machine learning and deep learning techniques [Текст]. Energy Reports, – 2024. Volume 12. – 3654–3670 p.

6 **Hashim, M., Khan, L., Javaid, N., Ullah, Z., Javed, A.** Stacked machine learning models for non-technical loss detection in smart grid: A comparative analysis [Текст]. Energy Reports, – 2024. Volume 12. – 1235–1253 p.

7 **Allal, Z., N.Noura, H., Salman, O., Chahine, K.** Leveraging the power of machine learning and data balancing techniques to evaluate stability in smart grids [Текст]. Engineering Applications of Artificial Intelligence, – 2024. Volume 133, Part C, – 108304 p.

8 **Munusamy, N., Vairavasundaram, I.** AI and Machine Learning in V2G technology: A review of bi-directional converters, charging systems, and control strategies for smart grid integration [Текст]. e-Prime - Advances in Electrical Engineering, Electronics and Energy, – 2024. Volume 10. – 100856 p.

9 **Chen, T., Liu, C.** Soft computing based smart grid fault detection using computerised data analysis with fuzzy machine learning model [Текст]. Sustainable Computing: Informatics and Systems, – 2024. Volume 41, – 100945 p.

10 **Нетбай, Г. В., Онискив, В. Д., Столбов, В. Ю., Каримов, Р. Р.** Прогнозное управление локальной городской системой теплоснабжения на основе нейросетевого моделирования [Текст]. Вестник ЮУрГУ, Серия «Компьютерные технологии, управление, радиоэлектроника», – 2020. Т. 20, № 3, – 29–38 с.

11 **Богуславский, А. А., Боровин, Г. К., Карташев, В. А., Павловский, В. Е., Соколов, С. М.** Модели и алгоритмы для интеллектуальных систем управления [Текст]. М. : ИПМ им.М.В.Келдыша, –2019. – 228 с.

12 **Самигулина, З. И., Курмашева, А. К., Қазбек, М. К.** Разработка системы автоматизации процессом отопления, вентиляции и

кондиционирования воздуха для пищевой промышленности на оборудовании фирмы HONEYWELL [Текст]. Вестник Казахстанско-Британского технического университета, – 2024. 21(1), 28-41 с.

13 **Нурлыбаева, Э. Н., Ташенова, Ж. М., Аманжолова, Ш. А., Сатымбеков, М. Н.** Интерфейсная обработка программных продуктов, определяющая тепломеханическое состояние стержня [Текст]. Вестник Казахстанско-Британского технического университета, – 2021. Том 18(3) : 56-68 с.

## REFERENCES

1 **Novickij, N. N., Shalaginova, Z. I., Alekseev, A. V., Tokarev, V. V., Grebneva, O. A., Lucenko, A. V., Vanteeva, O. V.** Sovremennoe sostoyanie, tendencii i zadachi intellektualizacii sistem teplosnabzheniya (obzor). [Intellectualization of Heat-Supply Systems: Current State, Trends and Tasks (a Review)] [Text]. Теплоэнергетика. – 2022. – №5. – 65-83 с.

2 **Khan, M. A., Sabahat, Z., Farooq, M. S., Saleem, M., Abbas, S., Ahmad, M., Mazhar, T., Shahzad, T., Saeed, M. M.** Optimizaciya upravleniya energopotrebieniem umnogo doma v celyah ustojchivogo razvitiya s ispol'zovaniem metodov mashinnogo obucheniya [Optimizing smart home energy management for sustainability using machine learning techniques] [Text]. Discover Sustainability. – 2024. – №5, 430 p.

3 **Ullah, A., Anwar, S. M., Li, J., Nadeem, L., Mahmood, T., Rehman, A., Saba, T.** Umnye goroda: rol' Interneta veshchej i mashinnogo obucheniya v sozdanii intellektual'noj sredy, orientirovannoj na dannye [Smart cities: the role of Internet of Things and machine learning in realizing a data-centric smart environment] [Text]. Complex & Intelligent Systems, – 2024. – 10: 1607–1637 p.

4 **Hasan, M. K., Abdulkadir, R. A., Islam, S., Gadekallu, T. R., Safie, N.** Obzor metodov mashinnogo obucheniya dlya zashchishchennyh kiberfizicheskikh sistem v setyah smart grid [A review on machine learning techniques for secured cyber-physical systems in smart grid networks] [Text]. Energy Reports, – 2024. Volume 11. – 1268-1290 p.

5 **Biswal, B., Deb, S., Datta, S., Ustun, T. S., Cali, U.** Obzor intellektual'nogo prognozirovaniya nagruzki na energosistemu dlya intellektual'nogo upravleniya energopotrebieniem s ispol'zovaniem metodov mashinnogo obucheniya i glubinnogo obucheniya [Review on smart grid load forecasting for smart energy management using machine learning and deep learning techniques] [Text]. Energy Reports, – 2024. Volume 12. – 3654–3670 p.

6 **Hashim, M., Khan, L., Javaid, N., Ullah, Z., Javed, A.** Kompleksnyye modeli mashinnogo obucheniya dlya obnaruzheniya netekhnicheskikh poter' v intellektual'nyh setyah : sravnitel'nyy analiz [Stacked machine learning models

for non-technical loss detection in smart grid : A comparative analysis] [Text]. Energy Reports, – 2024. Volume 12. – 1235–1253 p.

7 **Allal, Z., N. Noura, H., Salman, O., Chahine, K.** Ispol'zovanie vozmozhnostej mashinnogo obucheniya i metodov balansirovki dannyh dlya ocenki stabil'nosti intellektual'nyh setej [Leveraging the power of machine learning and data balancing techniques to evaluate stability in smart grids] [Text]. Engineering Applications of Artificial Intelligence, – 2024. Volume 133, Part C, – 108304 p.

8 **Munusamy, N., Vairavasundaram, I.** Iskusstvennyj intellekt i mashinnoe obuchenie v tekhnologii V2G: obzor dvunapravlennyh preobrazovatelej, sistem zaryadki i strategij upravleniya dlya integracii v intellektual'nyu set' [AI and Machine Learning in V2G technology: A review of bi-directional converters, charging systems, and control strategies for smart grid integration] [Text]. e-Prime - Advances in Electrical Engineering, Electronics and Energy, – 2024. Volume 10. – 100856 p.

9 **Chen, T., Liu, C.** Obnaruzhenie neispravnostej intellektual'noj seti na osnove myagkih vychislenij s ispol'zovaniem komp'yuterizirovannogo analiza dannyh i modeli nechetkogo mashinnogo obucheniya [Soft computing based smart grid fault detection using computerised data analysis with fuzzy machine learning model] [Text]. Sustainable Computing: Informatics and Systems, – 2024. Volume 41, – 100945 p.

10 **Netbaj, G. V., Oniskiv, V. D., Stolbov, V. YU., Karimov, R. R.** Prognoznoe upravlenie lokal'noj gorodskoj sistemoy teplosnabzheniya na osnove nejrosetevogo modelirovaniya [Predictive management of a local urban heat supply system based on neural network modeling] [Text]. Vestnik YUUrGU, Seriya «Komp'yuternye tekhnologii, upravlenie, radioelektronika», – 2020. T. 20, № 3, – 29–38 c.

11 **Boguslavskij, A. A., Borovin, G. K., Kartashev, V. A., Pavlovskij, V. E., Sokolov S. M.** Modeli i algoritmy dlya intellektual'nyh sistem upravleniya [Models and algorithms for intelligent control systems] [Text]. M. : IPM im.M.V.Keldysha, – 2019. – 228 p.

12 **Samigulina, Z. I., Kurmasheva, A. K., Kazbek, M. K.** Razrabotka sistemy avtomatizacii processov otopeniya, ventilyacii i kondicionirovaniya vozduha dlya pishchevoj promyshlennosti na baze oborudovaniya honeywell [Development of a process automation system for heating, ventilation and air conditioning for the food industry on the basis of honeywell equipment] [Text]. Herald of the Kazakh-British technical university, – 2024. 21(1), 28-41 p.

13 **Nurlybayeva, E. N., Tashenova, Zh. M., Amanzholova, Sh. A., Satymbekov M. N.** Interfejsnaya obrabotka programmnyh produktov, opredelyayushchih teplovoe i mekhanicheskoe sostoyanie sterzhnya [Interface

processing of software products, determining the heat and mechanical state of the rod] [Text]. Vestnik Kazhastansko-Britanskogo tekhnicheskogo universiteta, – 2021. 18 (3): 56-68 p.

Поступило в редакцию 30.12.24

Поступило с исправлениями 13.01.25

Принято в печать 10.03.25

\* *Ж. Р. Баденова, Н. К. Ердыбаева, А. М. Акаев*

<sup>1,2,3</sup>Д. Серікбаев атындағы Шығыс Қазақстан техникалық университеті,

Қазақстан Республикасы, Өскемен қ.

30.12.24 ж. баспаға түсті.

13.01.25 ж. түзетулерімен түсті.

10.03.25 ж. басып шығаруға қабылданды.

## МАШИНАЛЫҚ ОҚЫТУ АЛГОРИТМДЕРІНЕ НЕГІЗДЕЛГЕН ЖЫЛУ ЖЕЛІЛЕРІН БАСҚАРУДЫҢ ИНТЕЛЛЕКТУАЛДЫ ЖҮЙЕЛЕРІН ӘЗІРЛЕУ ЖӘНЕ ОҢТАЙЛАНДЫРУ

*Мақалада энергия тиімділігін арттыру мақсатында жылу желілерін басқарудың интеллектуалды жүйелерін әзірлеу мен оңтайландырудың заманауи тәсілдері қарастырылады. Энергияны тұтынудың өсуі және көміртегі ізін азайту талаптарының күшеюі жағдайында жылу желілерін тиімді басқару қажеттілікке айналады. Бұл мәселені шешу үшін жылу қажеттіліктерін дәл болжауға және жылу ресурстарын бөлуді оңтайландыруға мүмкіндік беретін машиналық оқыту алгоритмдері және үлкен деректерді талдау сияқты инновациялық технологияларды пайдалану ұсынылады. Зерттеудің мақсаты - энергия қажеттілігінің динамикалық өзгерістерін ескере отырып, жылу желілеріндегі жылудың таралуын оңтайландыруға қабілетті интеллектуалды басқару жүйесін әзірлеу. Мақалада жылу желілерін басқарудың қолданыстағы технологияларын талдау, олардың кемшіліктері, мысалы, басқарудың жоғары орталықтандырылуы және қажеттіліктердің өзгеруіне жауап берудегі икемділіктің жеткіліксіздігі көрсетілген.*

*Зерттеу әдістемесі нақты уақыттағы желі күйі туралы деректерді жинау үшін сенсорларды, контроллерлерді және есептеу қуатын біріктіруге негізделген жүйе архитектурасының сипаттамасын қамтиды. Жылу тұтынуды болжау Машиналық оқыту алгоритмдері арқылы жүзеге асырылады, соның ішінде регрессиялық модельдер, нейрондық желілер және уақыт сериялары*

әдістері, бұл жылу тұтынуға әсер ететін әртүрлі факторларды ескеруге мүмкіндік береді.

*Кілтті сөздер:* интеллектуалды жүйелер, жылу желілерін басқару, энергия тиімділігі, процестерді оңтайландыру, автоматтандыру, Машиналық оқыту, Заттар интернеті.

\*Zh. R. Badenova, N. K. Yerdybayeva, A. M. Akayev

<sup>1,2,3</sup>D. Serikbayev East Kazakhstan technical university,

Republic of Kazakhstan, Ust-Kamenogorsk

Received 30.12.24

Received in revised form 13.01.25

Accepted for publication 10.03.25

## DEVELOPMENT AND OPTIMIZATION OF INTELLIGENT HEATING GRID MANAGEMENT SYSTEMS BASED ON MACHINE LEARNING ALGORITHMS

*The article discusses modern approaches to the development and optimization of intelligent heating network management systems in order to improve energy efficiency. In the face of increasing energy consumption and increasing requirements for reducing the carbon footprint, effective management of heating networks becomes a necessity. To solve this problem, it is proposed to use innovative technologies such as machine learning algorithms and big data analysis, which allow you to accurately predict heat needs and optimize the distribution of heat resources. The purpose of the study is to develop an intelligent control system capable of optimizing the distribution of heat in heating networks, taking into account dynamic changes in energy requirements. The article presents an analysis of existing technologies for managing heating networks, their shortcomings, for example, high centralization of management and insufficient flexibility in responding to changes in needs.*

*The research methodology includes a description of the system architecture based on the integration of sensors, controllers and computing power to collect real-time network status data. Heat consumption forecasting is performed using machine learning algorithms, including regression models, neural networks, and time series methods, which allow you to take into account various factors that affect heat consumption.*

*Keywords:* intelligent systems, thermal grid management, energy efficiency, process optimization, automation, machine learning, Internet of Things.

МРНТИ 65.09.03

<https://doi.org/>

**К. С. Бекбаев<sup>1</sup>, \*Б. Б. Кабулов<sup>2</sup>, Г. Б. Абдилова<sup>3</sup>,  
Д. Р. Орынбеков<sup>4</sup>, Б. Т. Болкенов<sup>5</sup>**

<sup>1,2,3,4,5</sup> Университет Шакарима, Республика Казахстан, г. Семей

<sup>1</sup>ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-9591-0370>

<sup>2</sup>ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-7619-2622>

<sup>3</sup>ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-6647-6314>

<sup>4</sup>ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-9647-7046>

<sup>5</sup>ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-5356-7874>

\*e-mail: [bolatkabylov@mail.ru](mailto:bolatkabylov@mail.ru)

## СОВРЕМЕННЫЕ МЕТОДЫ ПЕРВИЧНОЙ ОБРАБОТКИ ЛИГНОЦЕЛЛЮЛОЗНОГО СЫРЬЯ ДЛЯ ПРОИЗВОДСТВА БИОТОПЛИВА

*Статья посвящена методам первичной обработки лигноцеллюлозного сырья. Назначение первичной обработки заключается в превращении биомассы из лигноцеллюлозы в полезные химические вещества. В статье проведен анализ современных исследований в области первичной обработки лигноцеллюлозного сырья. Результаты этих исследований направлены на повышение эффективности переработки отходов растениеводства. Также рассмотрены методы первичной обработки лигноцеллюлозного сырья. Многие исследователи отмечают, что положительно влияет на эффективность дальнейшей переработки. Представляют собой такие методы первичной обработки как измельчение, обработка паром, автогидролиз, водная горячая обработка, щелочная обработка и обработка перекисью, комбинированная обработка и т.д. При небольших значениях pH могут формироваться различные типы ингибиторов: карбоновые кислоты, фураны и фенольные соединения. Этот процесс можно отнести к основному минусу большинства методов первичной обработки. Многие из рассмотренных методов первичной обработки имеет больше плюсов, но наиболее перспективными являются комбинированные методы обработки. В особенности вызывает интерес использование различных комбинированных методов, таких как гидролиз с применением*

*кислотных или щелочных растворов, экстракция с использованием растворителей или механохимические методы, которые весьма эффективны при производстве пищевых добавок, биотоплива, экстракции активных веществ и т.д.*

*Ключевые слова: первичная обработка, отходы, растительное сырье, комбинированный метод, лигноцеллюлоза.*

## **Введение**

Известно, что лигноцеллюлоза является одним из отходов промышленной деятельности человека. Ее необходимо перерабатывать экономически выгодно и экологически безопасно. В настоящее время основным этапом производства биоэтанола является гидролиз материалов из лигноцеллюлозы. Например, если включить в процесс ферментативного гидролиза первичную обработку лигноцеллюлозы, то можно повысить эффективность этого процесса. Также при производстве этанола путем первичной обработки сырья можно увеличить его доступность для ферментов. При такой обработке увеличиваются площадь поверхности и размер пор. Кроме того, происходит снижение кристалличности и степени полимеризации целлюлозы [1, с. 1621-1625].

Биомасса из лигноцеллюлозы является ценным органическим сырьем, которое можно эффективно использовать для устойчивого производства биоэнергии и биотоплива, включая биогаз (состав: 50-75% CH<sub>4</sub> и 25-50% CO<sub>2</sub>). Среди различных технологий биоконверсии анаэробное сбраживание представляет собой наиболее экономически выгодный метод для получения биотоплива и биоэнергии, и оно активно используется в ряде стран для коммерческого производства электроэнергии, тепла и сжатого природного газа из органических материалов [2, с. 36-42]. Несмотря на его потенциал, биомасса из лигноцеллюлозы редко используется для получения биогаза через анаэробное сбраживание, поскольку сложная структура клеточной стенки растений делает ее достаточно стойкой к воздействию микробов.

Первичная обработка играет ключевую роль в превращении биомассы из лигноцеллюлозы в полезные химические вещества. Для разных видов биомассы из лигноцеллюлозы требуются индивидуальные процессы и условия первичной обработки, которые зависят от выбранных технологических конфигураций, определяющих дальнейшие этапы гидролиза и ферментации [3, с. 198-201].

## **Материалы и методы**

Статья посвящена анализу различных методов первичной обработки лигноцеллюлозного сырья. Среди них выделяются такие методы, как измельчение, автогидролиз, паровая обработка, обработка при помощи

сверхкритического углекислого газа, комбинированные методы обработки и т.д.

Рассмотрим некоторые из методов первичной обработки. Например, измельчение.

Так, для улучшения ферментативного гидролиза, либо ускорения разложения отходов из лигноцеллюлозы применяется измельчение различных видов. В рамках решения задач по переработке отходов, содержащих целлюлозу, были проведены экспериментальные исследования, направленные на оптимизацию процессов первичной обработки, ферментативного гидролиза и переработки полученных продуктов. В качестве источника целлюлозы использовалась механически отделенная от бытовых отходов бумага. Поскольку целлюлоза является доступным субстратом для ферментов, были исследованы различные виды первичной обработки и проведен экономический анализ. С технологической и экономической точек зрения оптимальный процесс включал следующие этапы: измельчение на молотковой мельнице, гидролиз в течение 24 часов при pH 4,8 и температуре 50°C с добавлением около 1 % целлюлазы *Trichoderma viride*, а также концентрирование раствора глюкозы. В ходе эксперимента была достигнута конверсия целлюлозы до 60 %, а также установлено, что рециркуляция фермента возможна в пределах 50 % [4, с. 130-133].

Особого внимания заслуживает такой вид первичной обработки как автогидролиз. Он является важным физико-химическим процессом удаления гемицеллюлозы при производстве этанола. При автогидролизе можно удалить большую ее часть. На стадии парового взрыва происходит следующее: резко падает давление, в результате чего сырье подвергается мгновенной декомпрессии. В этот период в интервале времени от 30 до 1200 с сначала увеличивается давление. Далее повышается температура в пределах 160÷260°C. Процесс парового взрыва можно сказать, что изучен полностью. Кроме того, этот процесс испытан в лабораторных и экспериментальных условиях. В результате увеличения степени первичной обработки с 3,08 до 3,76, извлечение гемицеллюлозы снизилось до 43% от исходной гемицеллюлозы, которая была обнаружена в щепках дугласовой ели, в то время как концентрация глюкозы, образующейся в ходе гидролиза целлюлозы, увеличилась вместе с концентрацией продуктов разложения сахара: фурфурол и гидроксиметилфурфурол.

В настоящий момент биоэтанол изготавливается из сахаров и крахмалосодержащих материалов, однако в будущем лигноцеллюлоза станет основным сырьем для его производства. В данной работе [5, с. 473-480] рассматривается процесс кислотного гидролиза, включая первичную обработку концентрированной и разбавленной кислотой, а также сам

гидролиз. Также анализируются различные типы гидролизных реакторов, такие как с обратным потоком, перколяцией, противотоком и со сжатым слоем. В работе уделяется внимание ферментации гексоз и пентоз, влиянию ингибиторов на ферментацию, а также последующей переработке и очистке сточных вод. Обзор включает используемые аналитические методы и анализ текущего коммерческого состояния процессов получения этанола с использованием кислот. Следует отметить, что ферментативный гидролиз нативной лигноцеллюлозы протекает слишком медленно, что ограничивает его эффективность. Также рассматриваются перспективные технологии первичной обработки биомассы из лигноцеллюлозы и их влияние на качество конечного продукта [6; 7].

Цель первичной обработки паровым взрывом – получение целлюлозы, которая восприимчива к ферментативному гидролизу. Фракции лигнина и гемицеллюлозы необходимо частично или полностью удалить для усиления гидролиза. В работе [8, с. 3-57] рассматривается подробное обсуждение физико-химических характеристик лигноцеллюлозы, которые нужно учитывать при разработке оптимального варианта первичной обработки. Приведены технико-экономические оценки основных видов первичной обработки, которые основаны на экстракции органическими растворителями, взрывной декомпрессии (паровой взрыв) и мокром окислении.

Аммиачное разрушение - один из процессов первичной обработки целлюлозы. В этом процессе сырье из целлюлозы обрабатывается жидким аммиаком при температуре  $90 \div 100^\circ\text{C}$  продолжительностью до 1800 с. Затем подвергается обработке при резком падении давления. Такая обработка включает в себя многие регулируемые параметры (содержание аммиака, уровень воды, температурный режим, период обработки и т.д. [9, с. 60-71]. Исследование влияния этих параметров на ферментативную чувствительность проведено для 3 материалов: прибрежной бермудской травы, жома и газеты. В результате аммиачного разрушения целлюлозы возможно получить материал с высокой твердостью. Другие методы первичной обработки не дают такой возможности. При этом содержание лигнина в материалах из лигноцеллюлозы может значительно измениться. В то же время доля частиц гемицеллюлозы и целлюлозы не изменяется. При благоприятных условиях аммиачное разрушение может значительно улучшить ферментативный гидролиз целлюлозы. Эти условия для рассмотренного метода находятся в непосредственной зависимости от вида материалов из лигноцеллюлозы.

Водная горячая обработка является одним из распространенных методов первичной обработки материалов из лигноцеллюлозы. При такой обработке под давлением вода впитывается в биомассу. Затем она гидратирует целлюлозу, далее выводит гемицеллюлозу и часть лигнина. Основным преимуществом

водной горячей обработки заключается в следующем: отказ от использования реагентов и коррозионностойких материалов. Для этого метода обработки нет необходимости в потреблении большого количества энергии и расхода значительного содержания реагентов. Углеводы гемицеллюлозы могут быть расщеплены как олигосахариды. Затем они разделяются с нерастворимыми частицами целлюлозы и лигнина. Горячая вода обрабатывает и увеличивает необходимую поверхность целлюлозы. Оба метода паровой и водной горячей обработки можно отнести к гидротермальным видам обработки. Водная горячая обработка имеет некоторые преимущества перед паровой обработкой. Эти преимущества заключаются в хорошем качестве восстановления пентозанов и малом содержании образуемых ингибиторных компонентов.

Щелочная обработка сырья и обработка перекисью можно отнести с одним из самых эффективных методов первичной обработки. Сырье из лигноцеллюлозы увлажняется водой при комнатной температуре. Также оно подвергается обработке в водном растворе NaOH с уровнем pH -  $11 \div 12$ . Кроме того, дополнительно обрабатывается в растворе с содержанием  $\text{H}_2\text{O}_2$  в течение  $6 \div 24$  ч. Таким методом обработки из пшеничной соломы ферментативным осахариванием можно получить сбродившийся сахар с достаточно высоким выходом до 97 %. В работе [10, с. 450-452] было установлено, что в ходе первичной обработки не было получено измеримых количеств фурфурола и гидроксиметилфурфурола.

Метод влажного окисления пшеничной соломы был изучен для решения такой задачи, как ферментативно расщепить целлюлозу до глюкозы и растворить гемицеллюлозу без образования микробных ингибиторов [11, с. 570-575]. Мокрое окисление с добавлением оснований может быстро и легко окислить лигнин пшеничной соломы, который упрощает ферментативный гидролиз полисахаридов. В результате использования специально сконструированной автоклавной системы процесс мокрого окисления оптимизировался и по времени реакции, и по температуре. Самые благоприятные условия (солома 20 г/л,  $170^\circ\text{C}$ , от 300 до 600 с) выдавали в пределах 85% по массе при превращении целлюлозы в глюкозу.

Первичная обработка с помощью влажного окисления применяется при производстве биоэтанола. При этой обработке в качестве материала используется древесины из хвои. В ходе этого процесса сырье подвергается водной и воздушной обработке или кислородной обработке. Режим обработки гемицеллюлозы с помощью влажного окисления соответствует  $148 \div 200^\circ\text{C}$  в течение 1800 с [12, с. 3-15]. Основными параметрами процесса являются температурный режим, продолжительность обработки и давление кислорода. Такой процесс обработки представляет собой баланс между солубилизацией и деградацией. В результате обработки эффективно разделяются частицы



целлюлозы от лигнина и гемицеллюлозы. Кроме того, твердая составляющая содержала целлюлозу в количестве до 64%, гемицеллюлозу – до 16% и лигнин – до 30%.

Особый интерес представляют комбинированные методы как одни из перспективных методов первичной обработки лигноцеллюлозного сырья. Рассмотрим следующие комбинированные методы первичной обработки лигноцеллюлозного сырья.

Mais с соавторами использовал реактор шаровой мельницы для первичной обработки и гидролиза  $\alpha$ -целлюлозы из щепы. Древесина дугласовой ели предварительно была пропитана сернистым газом и обработана паровым взрывом [13, с. 816-830]. По словам авторов количество шаровых дисков оказывает значительное влияние на ферментативный гидролиз  $\alpha$ -целлюлозы. В ходе обработки постоянно контролировали степень и скорость гидролиза, профили адсорбции фермента и скорость превращения в процессе гидролиза. Субстрат из древесины хвойных пород дополнительно обрабатывался водой и горячей щелочной перекисью водорода для удаления более 90% исходного лигнина. Кроме того, оценивались эксперименты при различных условиях реакции, включая концентрацию субстрата, загрузку фермента, реакционные объемы и количество шариковых шариков, используемых во время механического измельчения. Самые благоприятные условия для ферментативного гидролиза  $\alpha$ -целлюлозы могут быть достигнуты при большом количестве гранул, в тот же период наличие границы раздела воздух-жидкость не влияет на скорость осахаривания.

В исследованиях Jin и Chen [14, с. 226-229] был изучен ферментативный гидролиз рисовой соломы, обработанной паровым взрывом. Рисовая солома подвергалась очень тонкому измельчению до размера 60 мкм. Далее солома была порезана на частицы размером до 8 см и обработана паровым взрывом при различных температурах от 180°C до 220°C в течение 240÷300 с. Ферментативный гидролиз, химический состав, характеристики волокна и соотношение составных клеток продукта сверхтонкого измельчения и измельченного остатка демонстрируют большие различия. Отличие в ферментативном гидролизе и структурных свойствах указывает на то, что сверхтонкое измельчение является хорошим методом фракционирования рисовой соломы на две части: легко биоконвертируемую и трудногидролизуемую. При этом расход энергии на измельчение на технологической установке с многокомпонентным сырьем может поддерживаться на уровне ниже 30 кВт·ч на тонну отходов. Получены условия, при которых конечный размер частиц будет поддерживаться в диапазоне 3÷6 мм [15, с. 155-156]. В процессе обработки увеличена скорость

измельчения за счет использования мелющих шаров смешанного размера для мельниц сверхтонкого помола [16, с. 748-750].

В работе [17, с. 708-730] рассматриваются разработки в области технологии получения этанола из лигноцеллюлозных материалов с помощью «ферментативных» процессов. Приведены методы первичной обработки лигноцеллюлозы, при которых раскрывается кристаллическая структура лигноцеллюлозы. Это делает ее более доступной для ферментов целлюлазы. Даются характеристики этих ферментов и важные факторы, влияющие на ферментативный гидролиз целлюлозы и гемицеллюлозы с образованием целлобиозы, глюкозы и других сахаров. Описываются различные стратегии ферментативного гидролиза и ферментации, включая отдельный ферментативный гидролиз, ферментацию и т.д.

#### Результаты и обсуждение

В результате изучения методов первичной обработки выявлено, что самыми распространенными являются комбинированные методы. Установлено, что использование комбинированных методов улучшает эффективность извлечения целлюлозы или других компонентов из растительных материалов, таких как древесина, солома, тростник и другие виды биомассы. Основной целью этих методов является разрушение лигнина и других соединений, которые связывают целлюлозные волокна, чтобы улучшить доступность целлюлозы для дальнейшей переработки, например, для получения биоэнергии, биотоплива, биопродуктов или в производстве бумаги.

Одним из эффективных комбинированных методов первичной обработки является гидролиз в сверхкритическом углекислом газе, в котором используется сверхкритический CO<sub>2</sub> для улучшения эффективности ферментативных реакций, в частности, гидролиза различных веществ с помощью ферментов.

#### Информация о финансировании

Это исследование было профинансировано Комитетом науки Министерства науки и высшего образования Республики Казахстан по гранту №BR24992914.

#### Выводы

Комбинирование механической обработки (например, измельчение, шлифование, экструзия) и химической обработки (обработка кислотой, щелочью или растворителем) используется для того, чтобы снизить размер частиц, улучшить разрушению лигнина и облегчить процесс удаления клетчатки. **Комбинирование физико-химических методов таких, как паровая обработка, кислотно-щелочной гидролиз** при высоких температурах и давлениях способствует разрушению лигнина и повышению

доступности целлюлозы, ускорению гидролиза полисахаридов, таких как гемицеллюлоза. Гидролиз в сверхкритическом углекислом газе улучшает активность ферментов, изменяя структуру фермента, а также снижая энергетические барьеры для реакции.

Таким образом, исследование методов первичной обработки лигноцеллюлозного сырья позволило выявить их влияние на выход и качество продукта. Большинство рассмотренных методов первичной обработки лигноцеллюлозного сырья имеет множество преимуществ, но наиболее перспективными являются комбинированные методы обработки. В особенности вызывает интерес использование различных комбинированных методов, таких как гидролиз с применением кислотных или щелочных растворов, экстракция с использованием растворителей или механохимические методы, которые весьма эффективны при производстве биотоплива, экстракции активных веществ и т.д.

#### СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1 **Mohammad, J.** Pretreatment of Lignocellulosic Wastes to Improve Ethanol and Biogas Production: A Review. / J. Mohammad, K. Keikhosro // *Int. J. Mol. Sci.* - 2008, № 9. - P. 1621-1651.

2 **Zheng, Y.** Pretreatment of lignocellulosic biomass for enhanced biogas production / [Y. Zheng](#), J. Zhao, F. Xu, Y. Li // [Progress in Energy and Combustion Science](#). – 2014, № 6. – P. 35-53.

3 **Chen, H.** A review on the pretreatment of lignocellulose for high-value chemicals / H. Chen, J. Liu, X. Chang, etc. // [Fuel Processing Technology](#). – 2017, № 1. – P. 196-206.

4 **Walpot J.I.** Enzymatic hydrolysis of waste paper. *Conserv. Recycling*. - 1986, № 9. - P. 127-136.

5 **Taherzadeh, M.J.** Acid-based hydrolysis processes for ethanol from lignocellulosic materials: A review / M.J. Taherzadeh, K. Karimi // *BioResources*. - 2007, № 2. - P. 472-499.

6 **Mosier, N.S.** Features of promising technologies for pretreatment of lignocellulosic biomass / [N.S. Mosier](#), [C.E. Wyman](#), [B.E. Dale](#), [R. Elander](#) // [Bioresource Technology](#). - 2005, № 96(6). - P. 673-686.

7 **Fan, L.T.** The nature of lignocellulosics and their pretreatments for enzymatic hydrolysis / [L.T. Fan](#), [Y.H. Lee](#), [M.M. Gharpuray](#) // [Advances in Biochemical Engineering/biotechnology](#). – 1982, № 23. – P.158-187.

8 **Chum, H.L.** Evaluation of pretreatments of biomass for enzymatic hydrolysis of cellulose / H.L. Chum, L.J. Douglas, D.A. Feinberg etc. // *Solar Energy Research Institute*. – Colorado, 1985, № 1. – P. 1-64.

9 **Holtzapple, M.T.** The ammonia freeze explosion (AFEX) process – A practical lignocellulose pretreatment / M.T. Holtzapple, J.H. Jun, G. Ashok etc. // *Appl. Biochem. Biotechnol.* - 1991, № 8. - P. 59-74.

10 **Saha, B.C.** Ethanol production from alkaline peroxide pretreated enzymatically saccharified wheat straw / B.C. Saha, M.A. Cotta // *Biotechnol. Progr.* - 2006, № 2. - P. 449-453.

11 **Bjerre, A.B.** Pretreatment of wheat straw using combined wet oxidation and alkaline hydrolysis resulting in convertible cellulose and hemicellulose / [A.B. Bjerre](#), [A.B. Olesen](#), [T. Fernqvist](#), [A. Plöger](#), [A.S. Schmidt](#) // *Biotechnol Bioeng.* – 1996, № 49(5). – P. 568-577.

12 **Palonen, H.** Evaluation of wet oxidation pretreatment for enzymatic hydrolysis of softwood / H. Palonen, A.B. Thomsen, M. Tenkanen etc. // *Appl. Biochem. Biotechnol.* - 2004, № 7. - P. 1-17.

13 **Mais, U.** Enhancing the enzymatic hydrolysis of cellulosic materials using simultaneous ball milling / U.T. Mais, A.R. Esteghlalian, J.N. Saddler etc. // *Appl. Biochem. Biotechnol.* - 2002, № 8. - P. 815-832.

14 **Jin, S.** Superfine grinding of steam-exploded rice straw and its enzymatic hydrolysis / S. Jin, H. Chen // *Biochem. Eng. J.* - 2006, № 3. - P. 225-230.

15 **Cadoche, L.** Assessment of size reduction as a preliminary step in the production of ethanol from lignocellulosic wastes / [L. Cadoche](#), [G. Lopez](#) // [Biological Wastes](#). – 1989, № 30(2). – P.153-157.

16 **Choi, W.S.** Grinding Rate Improvement Using a Composite Grinding Ball Size for an Ultra-fine Grinding Mill / W.S. [Choi](#) // *Journal of the Society of Powder Technology*. – 1996. № 33(9). – P. 747-752.

17 **Taherzadeh, M.J.** Enzymatic-based hydrolysis processes for ethanol from lignocellulosic materials: A review / M.J. Taherzadeh, K. Karimi // *BioResources*. - 2007, № 2. - P. 707-738.

Поступило в редакцию 27.01.25

Поступило с исправлениями 07.02.25

Принято в печать 10.03.25

К. С. Бекбаев<sup>1</sup>, \*Б. Б. Кабулов<sup>2</sup>, Г. Б. Абдилова<sup>3</sup>, Д. Р. Орынбеков<sup>4</sup>,  
Б. Т. Болкенов<sup>5</sup>

<sup>1,2,3,4,5</sup>Шәкәрім университеті, Қазақстан Республикасы, Семей қ.

27.01.25ж. баспаға түсті.

07.02.25 ж. түзетулерімен түсті.

10.03.25 ж. басып шығаруға қабылданды.

## БИООТЫН ӨНДІРУ ҮШІН ЛИГНОЦЕЛЛЮЛОЗДЫ ШИКІЗАТТЫ БАСТАПҚЫ ӨНДЕУДІҢ ЗАМАНАУИ ӘДІСТЕРІ

Мақала лигноцеллюлоза шикізатын бастапқы өңдеу әдістеріне арналған. Бастапқы өңдеу лигноцеллюлозадан биомассаны пайдалы химиялық заттарға айналдыруда басты рөл атқарады. Өсімдік шикізатының қалдықтарын қайта өңдеу тиімділігін арттыру мақсатында лигноцеллюлоза шикізатын бастапқы өңдеу саласындағы заманауи зерттеулерге шолу жүргізілді. Мақалада бастапқы өңдеу әдістері келтірілген және олардың қайта өңдеу тиімділігіне әсері сипатталған. Ұсақтау, бумен өңдеу, автогидролиз, жоғары критикалық көмірқышқыл газын қолдану арқылы шикізатты өңдеу, ыстық сумен өңдеу, сілтімен және пероксидпен өңдеу, дымқыл тотығу арқылы өңдеу және аралас өңдеу сияқты бастапқы өңдеу әдістері қарастырылады. Бастапқы өңдеудің көптеген әдістерінің негізгі кемшілігі, әсіресе төмен рН мәндерінде, карбон қышқылдары, фурандар және фенолдық қосылыстар сияқты әртүрлі ингибиторлардың пайда болуы екені анықталды. Қарастырылған бастапқы өңдеу әдістерінің көпшілігінде көптеген артықшылықтар бар, бірақ ең перспективалы – ол аралас өңдеу әдістері. Атап айтқанда, қышқыл немесе сілтілі ерітінділерді қолдану арқылы гидролиз, еріткіштерді қолдану арқылы экстракция немесе механикалық-химиялық әдістер сияқты әртүрлі аралас әдістерді қолдану қызығушылық тудырады, олар тағамдық қоспалар, биоотын, белсенді заттарды алу және т. б. өндіруде өте тиімді.

Кілтті сөздер: бастапқы өңдеу, қалдықтар, өсімдік шикізаты, аралас әдістер, лигноцеллюлоза.

К. Bekbayev<sup>1</sup>, \*B. Kabulov<sup>2</sup>, G. Abdilova<sup>3</sup>, D. Orynbekov<sup>4</sup>,  
B. Bolkenov<sup>5</sup>

<sup>1,2,3,4,5</sup>Shakarim University, Republic of Kazakhstan, Semey

Received 27.01.25

Received in revised form 07.02.25

Accepted for publication 10.03.25

## MODERN METHODS OF PRIMARY PROCESSING OF LIGNOCELLULOSIC RAW MATERIALS FOR BIOFUEL PRODUCTION

The article is devoted to the methods of primary processing of lignocellulose raw materials. Primary processing plays a key role in converting biomass from lignocellulose into useful chemicals. A review of modern research in the field of primary processing of lignocellulose raw materials is conducted in order to increase the efficiency of processing waste plant raw materials. The article presents the methods of primary processing, and describes their impact on the efficiency of processing. Such pretreatment methods as grinding, steam treatment, autohydrolysis, destruction of lignocellulose with ammonia, processing of raw materials using supercritical carbon dioxide, hot water treatment, alkali and peroxide treatment, wet oxidation treatment and combined treatment are considered. It has been found that the main disadvantage of a number of primary processing methods, especially at low pH values, is the formation of various types of inhibitors such as carboxylic acids, furans and phenolic compounds. Most of the considered primary processing methods have many advantages, but the most promising are combined processing methods. In particular, the use of various combined methods, such as hydrolysis using acid or alkaline solutions, extraction using solvents or mechanochemical methods, which are very effective in the production of food additives, biofuels, extraction of active substances, etc., is of interest.

Keywords: primary processing, waste, vegetable raw materials, combined method, lignocellulose.

<https://doi.org/>

**\*Б. Б. Бекбауов<sup>1</sup>, К. Е. Арыстанбаев<sup>2</sup>, Б. М. Джаналиев<sup>3</sup>**

<sup>1,3</sup>М. Әуезов атындағы Оңтүстік Қазақстан университеті,

Қазақстан Республикасы, Шымкент қ.

<sup>2</sup>АҚ Оңтүстік Қазақстан медицина академиясы,

Қазақстан Республикасы, Шымкент қ.

<sup>1</sup>ORCID: <https://orcid.org/0009-0006-4603-3045>

<sup>2</sup>ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-9499-192X>

<sup>3</sup>ORCID: <https://orcid.org/0009-0000-1474-5423>

\*e-mail: [201ukgu@mail.ru](mailto:201ukgu@mail.ru)

## **АДДИТИВТІ МОДЕЛЬ БОЙЫНША ОҚУ ОРЫНДАРЫН ЭЛЕКТРЛІК ЭНЕРГИЯСЫМЕН ТҰТЫНУЫН ТАЛДАУ ЖӘНЕ БОЛЖАУ**

*Шымкент қаласының Оңтүстік Қазақстан медицина академиясы корпустарының бірінің электрлік тұтынуын болжау нәтижелері ұсынылды. Оқу орындарының ерекшелігіне байланысты (оқу жылы аралықта электрлік энергиясын біркелкі тұтынбауы) электрлік тұтынуды басқару жүйесін жетілдіру қажет. Электрлік энергиясын басқару процесінде шешім қабылдаудың тиімділігін арттыру әдістерінің бірі-жоспарлау. Алайда, жоспарлау нәтижесін қамтамасыз ету үшін, бухгалтерлік есеп пен егжей-тегжейлі талдау қажет. Жыл бойына ай сайынғы тұтыну шығындары туралы деректерді жедел есепке алу кезінде, оқу корпусының электрлік тұтынуын болжау бүкіл мекеменің электрлік тұтынуын жүйелік деңгейде басқаруға мүмкіндік береді.*

*Электрлік энергиясын тұтынуға әсер ететін негізгі фактор-маусымдық. Тұтынудағы маусымдық даму тенденциясын анықтайды, бірақ электрлік энергиясын тұтынудың нақты болжамын құру үшін бір қатар басқа факторларды да ескеру қажет. Мұндай факторларға мыналар жатады: білім алушылар контингентінің азаюына байланысты оқу орнының электрлік тұтынуының төмендеуі, университеттің ғылыми қызметінің төмендеуі, зертханалық жұмыстарды электрлік энергиясын аз тұтынуды талап ететін практикалық және семинарлық сабақтарға ауыстыру.*

*Сондықтан зерттеудің өзекті бағыты электрлік тұтынуды болжаудың қолданыстағы әдістерін бейімдеу және жаңа әдістерін әзірлеу болып табылады.*

*Бұл жұмыстың мақсаты қосымша модель бойынша оқу орындарының электрлік энергиясын тұтынуын талдау және болжау болып табылады.*

*2023 жылғы электрлік энергиясын тұтынудың нақты деректері бойынша маусымдық ауытқуларды ескере отырып, қосымша модель жасалды. Есептеу Excel бағдарламасының құралдарын қолдану арқылы жүзеге асырылды. Алынған қосымша модель уақыт қатарына байланысты электрлік энергиясын тұтынудың 80% өзгеруін түсіндіреді.*

*Кілтті сөздер: аддитивті модель, талдау, болжау, электрқуаты, модельдеу.*

### **Кіріспе**

Еліміздің әрбір жоғары оқу орны, еліміздің ең қарқынды дамып келе жатқан жоғары оқу орындарының бірі болуға және түлектерді сапалы даярлаудан басқа, түрлі инновациялық жобаларды енгізуге ұмтылады. Университеттің инновациялық дамуын жүзеге асыру және тиімді ғылыми нәтиже алу техникалық жаңалықтарды пайдаланбау мүмкін емес. Сондықтан зерттеу университеттері оқу және ғылыми жабдықтармен белсенді жабдықталған және университеттің энергия тұтынуы үнемі өсіп келеді.

Қалалық электрлік желілері шамадан тыс жүктелген және олардан университетке қуат бөлу кабельдік желілерді күшейту және қосымша қуат үшін ақы төлеу үшін айтарлықтай шығындарды қажет етеді.

Қазіргі уақытта барлық энергия өндірудің басым бөлігі органикалық отындардан тұрады.

Атом электрлік станциясының құрылысы электрмен жабдықтау мәселесін шешеді, бірақ бұл жақын арада болмайды. Сондықтан оқу орындарында электрлік энергиясын ұтымды пайдалану қажет.

Бұл мақалада қосымша модель бойынша оқу орындарының электрлік энергиясын тұтынуын талдау және болжау ұсынылады. Зерттеу нысаны ретінде Оңтүстік Қазақстан медицина академиясының 2023 жылғы электрлік энергиясын тұтынудың статистикалық деректері таңдалды.

### **Материалдар мен әдістері**

Бұл сөзді кең мағынада болжау болашақтың озық көрінісі ретінде анықталады. Болжаудың мақсаты - болашақ оқиғаларды болжау. Болжау белгілі бір объектінің немесе оқиғаның динамикасының тенденцияларын ретроспективті мәліметтер негізінде анықтауға бағытталған, яғни оның

өткен және қазіргі жағдайын талдау. Осылайша, болжау мәселесін шешу үшін кейбір оқыту деректерін таңдау қажет [1; 2].

Оқу орнының электрлік энергиясын тұтынуға жылдық қаржылық шығыны негізінде болжау элементтерін қолдануды қарастырыңыз.

Уақыттың дәйекті сәттері (кезеңдері) қатарында бір объектінің сипаттайтын мәліметтер бойынша құрылған модельдер уақыт қатарының модельдері деп аталады.

Уақыт қатары-бірнеше дәйекті сәттер немесе кезеңдердегі қандай да бір көрсеткіштің мәндерінің жиынтығы. Уақыт қатарының әр деңгейі трендтен (T), циклдік (S) және кездейсоқ (E) компонент. Модельдер, онда уақыт қатары тізімделген жиынтық ретінде ұсынылған компоненттер-аддитивті модельдер. Жеке уақыт қатарын эконометрикалық зерттеудің негізгі міндеті-жоғарыда аталған компоненттердің әрқайсысын анықтау және сандық өрнек беру, алынған ақпаратты жолдың болашақ мәндерін болжау үшін екі немесе одан да көп уақыт қатарларының өзара байланысының модельдерін құру кезінде пайдалану [3; 4; 5].

Базалық іріктеме ретінде 1-ші суретте ұсынылған Оңтүстік Қазақстан медицина академиясы 2023 жылы тұтынған электрлік энергиясына жұмсалған шығыстар таңдалды.

2023 жылғы 3310 шоты бойынша айналым-сальдо ведомосы					
Іріктеу: Контрагенттер "Энергопоток" ЖШС - ге тең					
Шот	Көрсеткіш	Период басындағы сальдо		Период бойынша айналым	
		Дебет	Несие	Дебет	Несие
Құрылымдық бөлім	Валюта				
Контрагенттер					
Легиял					
3310	БЕ			43 707 129,82	43 707 129,82
	Вал.			43 707 129,82	43 707 129,82
Бас бөлімше	БЕ			43 707 129,82	43 707 129,82
	Вал.			43 707 129,82	43 707 129,82
KZT	БЕ			43 707 129,82	43 707 129,82
	Вал.			43 707 129,82	43 707 129,82
ЖШС "Энергопоток"	БЕ			43 707 129,82	43 707 129,82
	Вал.			43 707 129,82	43 707 129,82
Қаңтар айындағы	БЕ			4 552 192,36	4 552 192,36
	Вал.			4 552 192,36	4 552 192,36
Ақпан айындағы	БЕ			3 683 487,27	3 683 487,27
	Вал.			3 683 487,27	3 683 487,27
Наурыз айындағы	БЕ			3 594 739,33	3 594 739,33
	Вал.			3 594 739,33	3 594 739,33
Сәуір айындағы	БЕ			2 802 994,51	2 802 994,51
	Вал.			2 802 994,51	2 802 994,51
Мамыр айындағы	БЕ			3 061 893,42	3 061 893,42
	Вал.			3 061 893,42	3 061 893,42
Маусым айындағы	БЕ			3 326 381,62	3 326 381,62
	Вал.			3 326 381,62	3 326 381,62
Шілде айындағы	БЕ			3 927 587,65	3 927 587,65
	Вал.			3 927 587,65	3 927 587,65
Тамыз айындағы	БЕ			3 310 635,79	3 310 635,79
	Вал.			3 310 635,79	3 310 635,79
Қыркүйек айындағы	БЕ			2 455 890,38	2 455 890,38
	Вал.			2 455 890,38	2 455 890,38
Қазан айындағы	БЕ			3 267 045,23	3 267 045,23
	Вал.			3 267 045,23	3 267 045,23
Қараша айындағы	БЕ			5 004 927,73	5 004 927,73
	Вал.			5 004 927,73	5 004 927,73
Желтоқсан айындағы	БЕ			4 719 354,53	4 719 354,53
	Вал.			4 719 354,53	4 719 354,53
Барлығы	БЕ			43 707 129,82	43 707 129,82
	Вал.			43 707 129,82	43 707 129,82

Сурет 1 – Электрлік энергиясының шығындары

Уақыт қатарларымен жұмыс істегенде, біз алдымен сызықтық және сызықтық емес регрессия модельдерін қолдана отырып трендтер құрамыз. Тренд сызықтары және 2023 жылға арналған электрлік энергиясын тұтыну болжамы 2-ші суретте көрсетілген.

Детерминация коэффициенті жоғары ең дәл тренд сызығын (T) таңдау оңтайлы модель құрудың жеткілікті шарты емес. Детерминация коэффициентінің өсуімен тренд катесі азаяды, бірақ жалпы модель емес [6].



Сурет 2 – Тренд сызықтары және 2023 жылға арналған электрлік энергиясын тұтыну болжамы

2-ші суреттен сызықтық емес модельдер тұрғысынан болжамдармен айқын болжам жоқ екенін көруге болады (суретте көк, қызғылт сары-логарифмдік, қара-экспоненциалды, қоңыр-сызықтық, жасыл – көпмүшелік), яғни кейбір болжамдар тым төмен нәтижелерді көрсетеді, басқалары шамадан тыс және тек регрессия теңдеуімен сипатталған тренд компоненті

$$y4 = -220372x + 5E+06, \tag{1}$$

жуықтаудың сенімділігімен  $R2 = 0,8$  1-суретте келтірілген деректерді ең жақын сипаттайды.

Маусымдық компонентті анықтау үшін  $R1 = 0.70, r2 = 0.71, r3 = 0.70$  автокорреляция коэффициенттері есептелді. Олар таңдалған үш кезеңнің арасында тәуелділік бар екенін көрсетеді.

Электрлік энергиясын тұтыну процесін математикалық модельдеу процесінде [7; 8; 9] оқу орындары қолданыстағы тербеліс процестерін бағалау қажеттілігін тудырады. Маусымдық ауытқулар электрлік энергиясын тұтынудың жылдық динамикасының азды-көпті тұрақты заңдылығын білдіреді. Олардың пайда болу себептері әр түрлі уақыт аралығында электрлік энергиясын біркелкі емес тұтыну болып табылады. Себебі оқу жылы қыркүйектен басталады және оны семестрлерге немесе триместрлерге бөлуге болады, ал жазғы кезең демалыс болып табылады. Маусымдық ауытқуларды зерттеудің практикалық маңыздылығы мынада: жылдық динамика қатарларын талдау кезінде алынған Сандық сипаттамалар оқу

жылының айлары бойынша зерттелетін құбылыстардың даму ерекшеліктерін көрсетеді.

Сондықтан, энергия шығынының өзгеруінің жалпы тенденциясын сипаттайтын тренд сызығын таңдағанда, маусымдық компонентті (S) есептеу керек және S орташа мәндерінің қосындысы 0-ден қаншалықты ауытқитынын қарау керек.

**Нәтижелер және талқылау**

Электрлік энергиясын тұтынуды болжаудың аддитивті моделі келесідей:

$$F = T + S + E. \tag{2}$$

Аддитивті модельдің құрылысы мәндерді есептеуге дейін азаяды T - тренд, S – маусымдық компонент, E - қателік қатардың әр деңгейі үшін.

Уақытша қатардың аддитивті моделі Шымкент қаласының Оңтүстік Қазақстан медицина академиясы 2023 жылы ұсынған 1-суретте келтірілген деректер негізінде құрылды. Аддитивті модельді есептеу нәтижелері Excel ортасында алынды, 3-ші сурет.

t	Yt	St	Yt-St	T	T+St	Et = Yt - (T+St)	Et^2	(Yt-Ye)^2
1	4 486 880,38	239 304,2	4 246 586,21	4862841,21	5101645,37	-645 754,99	416 999 510 986,27	5,38333E+11
2	5 267 048,23	10 834,4	5 256 213,86	465659,92	4666494,30	600 550,93	360 661 421 171,06	2,37607E+12
3	4 004 927,73	-250 138,5	4 255 066,27	4448978,64	4198840,10	-199 912,37	37 602 007 782,94	78027247985
4	4 719 354,53	239 304,2	4 480 050,36	4242297,36	4481601,52	237 753,01	56 526 491 738,17	9,8756E+11
5	4 452 192,36	10 834,4	4 541 357,99	4036616,08	4046450,45	505 741,91	255 774 679 243,59	6,83265E+11
6	3 683 487,27	-250 138,5	3 933 625,81	3828934,79	3578796,25	104 691,02	10 960 209 028,46	1,772989484
7	3 894 730,33	239 304,2	3 655 426,16	3622253,51	3861557,68	-266 818,35	71 192 029 672,20	1,7122984953
8	2 802 994,51	10 834,4	2 792 160,14	3415872,33	3426066,60	-623 412,09	388 642 636 375,28	8,5119E+11
9	3 061 880,42	-250 138,5	3 312 018,96	3208890,94	2958752,40	103 141,02	10 638 069 034,53	4,40499E+11
10	3 320 381,02	239 304,2	3 081 076,85	3002209,66	3241513,83	84 867,79	7 202 542 106,13	1,58971E+11
11	2 927 587,05	10 834,4	2 916 752,28	2796928,38	2806962,75	111 224,90	14 699 475 908,74	6,36814E+11
12	2 310 035,79	-250 138,5	2 560 174,33	2588847,10	2338708,56	-28 072,77	788 080 211,53	2,00211E+12
13	2621469,98						1 431 683 352 378,89	8 767 132 464 810,32
14	2186318,91						R^2	81%
15	1718664,71							

Сурет 3 – Аддитивті модельді есептеу нәтижелері

Детерминеттеу коэффициенті R2 80%-ға тең болды, бұл айнымалылар арасында себеп-салдарлық тәуелділіктің болуын көрсетеді.

4-ші суретте регрессия теңдеуінің коэффициенттерін есептеу нәтижелері көрсетілген. Регрессия теңдеуінің коэффициенттерін есептеу нәтижесінде келесі түрдегі регрессия теңдеуі алынды:

$$Y = 5088227,85x - 209635,95 \tag{3}$$

Бұл теңдеу (1) теңдеумен салыстырғанда біздің эксперименттік деректерімізді дәлірек сипаттайды.

Найқилерді шығару								
<b>Регрессиялық статистика</b>								
Множесте	0,881831849							
Р-квадрат	0,77762741							
Нормирое	0,755390151							
Стандарт	423924,615							
Наблюден	12							
<b>Дисперсиялық талдау</b>								
	df	SS	MS	F	Фиқарыдылығы			
Регрессия	1	6,2845E+12	6,28445E+12	34,96957114	0,0001483			
Остаток	10	1,7971E+12	1,79712E+11					
Итого	11	8,0816E+12						
<b>Коэффициенттер мен статистика</b>								
	коэффициент	көптелік	t-статистика	P-мәні	төменгі 95%	жоғарғы 95%	төменгі 95,0%	жоғарғы 95,0%
Үгересөч	5088227,851	260907,565	19,50203268	2,74558E-09	4506889,6	5669566,133	4506889,57	5669566,133
Перемені	-209635,9538	35450,3572	-5,913507516	0,000148335	-288624,3	-130547,6356	-288624,272	-130647,6356
<b>Қалдық шығару</b>								
Бқылау	Болжалған Y	Қалдықтар						
1	4878591,868	-603445,08						
2	4668935,944	501575,493						
3	4459319,59	-230884,95						
4	4249684,096	523420,533						
5	4040048,082	391400,716						
6	3830412,129	-243438,65						
7	3620776,175	197470,47						
8	3411140,221	-554395,67						
9	3201504,267	-320354,41						
10	2991868,313	237999,514						
11	2782232,359	368862,605						
12	2572596,406	-208210,58						

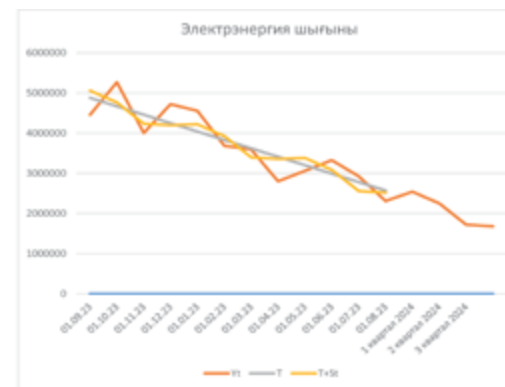
Сурет 4 – Регрессия теңдеуінің коэффициенттерін есептеу нәтижелері

Біздің модельдік және бастапқы деректерімізді салыстыру үшін оқу орнының 2023 жылға арналған электрлік энергиясы шығынын болжау

графикі салынды, 5-сурет. Мұндағы Yt – Оңтүстік Қазақстан медицина академиясының электрлік энергиясы үшін 2023 жылғы шығысы; T-тренд сызығы; T + St-тренд компоненті плюс маусымдық.

Осылайша, аддитивті модель уақыт қатарына байланысты электрлік энергиясын тұтынудың 80% өзгеруін түсіндіреді.

Оқу орындарында электрлік энергиясын тұтынуды есептеудің ұсынылған және енгізілген аддитивті моделі маусымдық ауытқуларды ескере отырып, электрлік энергиясын оңтайлы бөлуге мүмкіндік береді [10].



Сурет 5 – Электрэнергия шығынын талдау және болжау

**Қорытынды**

Жүргізілген эконометрикалық талдау негізінде Шымкент қаласының Оңтүстік Қазақстан медицина академиясында 2023 жылғы электрлік тұтынудың болжамды мәндері ұсынылды. Оқу орнының бір корпусының осындай перспективалық бағалауы шағын қаланы алып жатқан бүкіл оқу орнының электрлік тұтынуын оңтайландыруға мүмкіндік береді. Талдау көрсеткендей, жыл сайын электрлік энергиясын тұтыну үрдісіне әртүрлі факторлар әсер етеді. Бұл жерде университеттердің оқу процесі мен ғылыми бағытын ескеру өте маңызды. Жыл сайын білім алушылардың санына және қосымша қуат көздерін қажет ететін ғылыми зерттеулердің көлеміне байланысты тұтытуда әртүрлі өзгерістер орын алатынына қарамастан, электрлік энергиясын тұтыну тренді қалыптасты. Бұл қыркүйек айынан бастап жыл сайынғы тұтытуда жыл сайынғы секірістердің пайда болуын анықтайтын тренд. Алынған қосымша модель уақыт қатарына байланысты электрлік энергиясын тұтынудың 80% өзгеруін түсіндіреді.

Сондай-ақ, электрлік энергиясының шығындарын талдау және болжау кезінде қалалық электрлік желілерінің жүктемесін ескеру қажет.

#### ПАЙДАЛАНЫЛҒАН ДЕРЕК КӨЗДЕРДІҢ ТІЗІМІ

1 **Андерсон, Т.** Статистический анализ временных рядов [Текст]. – М.: Мир, 1976. – 756 с

2 **Афанасьев, В. Н.** Анализ временных рядов и прогнозирование [Текст]. – М.: Финансы и статистика, 2012. – 320 с.

3 **Рахмонов, И.У., Реймов, К.М.** Математические модели и алгоритмы оптимального управления нагрузкой электропотребителей [Текст] // Известия высших учебных заведений и энергетических объединений СНГ. – 2019. – № 62 (6). – С. 528-535.

4 **Klyuev, R. V., Morgoev, I. D., Morgoeva, A. D., Gavrina, O. A., Martyushev, N. V., Efremkov, E. A., Mengxu, Q.** Methods of forecasting electric energy consumption: A literature review [Текст] // Energies. – 2022. – 15(23). – P. 1-33.

5 **Зайцев, М. Г.** Методы оптимизации управления и принятия решений: примеры, задачи, кейсы [Текст]. – Москва : Дело РАНХиГС, 2017. – 640 с.

6 **Галочкин, В. Т.** Эконометрика: учебник и практикум для вузов [Текст]. – Москва: Издательство Юрайт, 2024. – 293с.

7 **Соколов, В. К.** Задачи оперативной оптимизации производства электроэнергии в условиях рыночных отношений [Текст] // Электричество. – 2007. – № 1. – С. 2–9.

8 **Dzhedzhula, V., Yepifanova, I.** Optimization of energy saving potential of industrial enterprises [Текст] // 11th International Conference on Advanced Computer Information Technologies (ACIT). – 2021. – P. 433-436.

9 **Суслов, В. И., Ибрагимов, Н. М., Тальшева, Л. П., Цыплаков, А. А.** Эконометрия [Текст]. – Новосибирск: СО РАН, 2005. – 744 с.

10 **Бекбауов, Б. Ж., Арыстанбаев, К. Е.** Автоматизация работы фотоветроэлектроэнергетической установки для эффективного распределения электроэнергии в учебном корпусе [Текст] // Вестник Казанского энергетического университета. – 2013. – №1(16). – С. 47-55

#### REFERENCES

1 **Anderson, T.** Statisticheski analiz vremennyh rädov [Statistical analysis of time series] [Text]. – М.: Mir, 1976. – 756 p.

2 **Afanasev, V. N.** Analiz vremennyh rädov i prognozirovanie [Time series analysis and forecasting] [Text]. – М.: Finansy i statistika, 2012. – 320 p.

3 **Rahmonov, İ. U., Reimov, K. M.** Matematicheskie modeli i algoritmy optimäl'nogo upravleniia nagruzkoï elektropotrebitelei [Mathematical models and algorithms for optimal control of the load of electrical consumers] [Text] // İzvestia vysshih uchebnyh zavedeni i energeticheskikh obedineni SNG. – 2019. – № 62 (6). – P. 528–535.

4 **Klyuev, R. V., Morgoev, I. D., Morgoeva, A. D., Gavrina, O. A., Martyushev, N. V., Efremkov, E. A., Mengxu, Q.** Methods of forecasting electric energy consumption: A literature review [Text] // Energies. – 2022. – 15(23). – P. 1-33.

5 **Zaisev, M. G.** Metody optimizatsii upravleniia i prinätia reşeni: primery, zadachi, keisy [Methods for optimizing management and decision making: examples, tasks, cases] [Text]. – Moskva : Delo RANHiGS, 2017. – 640 p.

6 **Galochkin, V. T.** Ekonometrika: uchebnik i praktikum dlä vuzov [Econometrics: textbook and workshop for universities] [Text]. – Moskva: İzdatelstvo İurait, 2024. – 293 p.

7 **Sokolov, V. K.** Zadachi operativnoi optimizatsii proizvodstva elektroenergii v usloviah rynochnyh otnoşeni [Problems of operational optimization of electricity production in market conditions] [Text] // Elektrichestvo. – 2007. – № 1. – P. 2-9.

8 **Dzhedzhula, V., Yepifanova, I.** Optimization of energy saving potential of industrial enterprises [Text] // 11th International Conference on Advanced Computer Information Technologies (ACIT). – 2021. – P. 433–436.

9 **Suslov, V. İ., İbragimov, N. M., Talyşeva, L. P., Syplakov, A. A.** Ekonometria [Econometrics] [Text]. – Novosibirsk: SO RAN, 2005. – 744 p.

10 **Bekbauov, B. Zh., Arystanbaev, K. E.** Avtomatizatsia raboty fotovetroelektroenergeticheskoi ustanovki dlä effektivnogo raspredeleniia elektroenergii v uchebnom korpuse [Automation of the operation of a photo-wind power plant for efficient distribution of electricity in an educational building] [Text] // Vestnik Kazanskogo energeticheskogo universiteta. – 2013. – №1(16). – P. 47-55

24.10.24 ж. баспаға түсті.

12.02.25 ж. түзетулерімен түсті.

10.03.25 ж. басып шығаруға қабылданды.



\*Б. Б. Бекбауов<sup>1</sup>, К. Е. Арыстанбаев<sup>2</sup>, Б. М. Джаналиев<sup>3</sup>

<sup>1,3</sup>Южно-Казахстанский университет имени М.Ауезова,

Республика Казахстан, г. Шымкент.

<sup>2</sup>Южно-Казахстанская медицинская академия,

Республика Казахстан, г. Шымкент.

Поступило в редакцию 24.10.24

Поступило с исправлениями 12.02.25

Принято в печать 10.03.25

### АНАЛИЗ И ПРОГНОЗИРОВАНИЕ ПОТРЕБЛЕНИЯ ЭЛЕКТРОЭНЕРГИИ УЧЕБНЫМИ ЗАВЕДЕНИЯМИ ПО АДДИТИВНОЙ МОДЕЛИ

*Представлены результаты прогнозирования электропотребления одного из корпусов Южно-Казахстанской медицинской академии города Шымкент. В связи с спецификой учебных заведений (неравномерное потребление электроэнергии в течении года) необходимо совершенствование системы управления электропотреблением. Одним из методов повышения эффективности принятия решений в процессе управления электропотреблением является планирование. Однако для обеспечения результативности планирования необходим учет и детальный анализ. Прогнозирование же электропотребления учебного корпуса позволяет на системном уровне управлять электропотреблением всего заведения при оперативном учете данных о расходе за потребление по месяцам в течении года.*

*Главным фактором, оказывающим воздействие на потребление электроэнергии, является сезонность. Сезонность в потреблении определяет тенденцию развития, однако для построения точного прогноза потребления электроэнергии необходимо учитывать также ряд других факторов. К таким факторам относятся: снижение электропотребления учебным заведением из-за уменьшения контингента обучающихся, снижения научной деятельности университета, замена лабораторных работ на практические и семинарские занятия, требующие меньшее потребление электроэнергии.*

*Поэтому актуальным направлением исследований является адаптация существующих и разработка новых методов прогнозирования электропотребления.*

*Целью в данной работе является анализ и прогнозирование потребления электроэнергии учебными заведениями по аддитивной модели.*

*По фактическим данным о электропотреблении за 2023 г. была построена аддитивная модель с учетом сезонных колебаний. Расчет был осуществлен с использованием инструментов программы Excel. Полученная аддитивная модель объясняет на 80% вариацию потребления электроэнергии в зависимости от временного ряда.*

*Ключевые слова: аддитивная модель, анализ, прогнозирование, электроэнергия, моделирование.*

\*B. Zh. Bekbauov<sup>1</sup>, K. E. Arystanbayev<sup>2</sup>, B. M. Janaliev<sup>3</sup>

<sup>1,3</sup>South Kazakhstan University named after M. Auezov,

The Republic of Kazakhstan, Shymkent

<sup>2</sup>JSC South Kazakhstan Medical Academy,

The Republic of Kazakhstan, Shymkent

Received 24.10.24

Received in revised form 07.02.25

Accepted for publication 10.03.25

### ANALYSIS AND FORECASTING OF ELECTRICITY CONSUMPTION BY EDUCATIONAL INSTITUTIONS USING AN ADDITIVE MODEL

*The results of forecasting the power consumption of one of the buildings of the South Kazakhstan Medical Academy of Shymkent are presented. Due to the specifics of educational institutions (uneven electricity consumption throughout the year), it is necessary to improve the power consumption management system. One of the methods to improve the efficiency of decision-making in the process of energy management is planning. However, accounting and detailed analysis are necessary to ensure the effectiveness of planning. Forecasting the power consumption of the educational building allows you to manage the power consumption of the entire institution at the system level with operational accounting of consumption data by month throughout the year.*

*The main factor affecting electricity consumption is seasonality. Seasonality in consumption determines the development trend, however, in order to build an accurate forecast of electricity consumption, a number of other factors must also be taken into account. These factors include:*

*reduction of power consumption by an educational institution due to a decrease in the number of students, a decrease in the scientific activity of the university, the replacement of laboratory work with practical and seminar classes that require less electricity consumption.*

*Therefore, an urgent area of research is the adaptation of existing and the development of new methods for forecasting electricity consumption.*

*The purpose of this work is to analyze and predict the electricity consumption of educational institutions using an additive model.*

*According to the actual data on electricity consumption for 2023, an additive model was built taking into account seasonal fluctuations. The calculation was carried out using Excel tools. The resulting additive model explains 80 % of the variation in electricity consumption depending on the time series.*

*Keywords: additive model, analysis, forecasting, electric power, modeling.*

МРНТИ 44.31.31

<https://doi.org/>**А. А. Генбач<sup>1</sup>, \*Д. Ю. Бондарцев<sup>2</sup>**<sup>1,2</sup>Алматынський Университет Энергетики и Связи

имени Г. Даукева, Республика Казахстан, г. Алматы

<sup>1</sup>ORCID: <https://orcid.org/0009-0001-3819-4387><sup>2</sup>ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-8778-7851>\*e-mail: [d.bondartsev@aues.kz](mailto:d.bondartsev@aues.kz)

## **ИССЛЕДОВАНИЕ ТЕПЛОБМЕНА В ПОКРЫТИЯХ ИЗ КРЕПКИХ МИНЕРАЛЬНЫХ СРЕД**

*Исследованы тепловые нагрузки для системы охлаждения с покрытиями из природных материалов. Определены условия напыления материала на поверхность нагрева. Исследования имеют значение для теплозащиты оборудования. В способе охлаждения используется одновременно два наиболее интенсивных процесса: взаимодействие турбулентной струи с преградой и кипение охладителя на поверхности нагрева. Разработаны устройства для проведения напыления покрытий детонационными высокотемпературными факелами. В исследованиях применялся метод голографической интерферометрии и скоростной киносъёмки. В опытах измерялись тепловые потоки, температуры, расходы, давления потоков жидкости и газа. Изготовление покрытий из природных материалов позволяет отводить более высокие критические нагрузки и стабилизировать процесс управления поверхностью. Подобраны характеристики горелок для генерации сверхзвуковых высокотемпературных детонационных факелов при напылении покрытий из порошков природных материалов. За счет сверхзвуковой скорости потока напыление происходит без плавления частиц порошка. Коэффициент избытка окислителя варьировался в пределах 0.3÷0.8; температура факела струи (3500÷850) 0С; длина струи (0÷0,16) м; радиус струи (3÷10) ·10-3 м. Предложенный механизм теплообмена эффективен для процесса напыления частиц (порошков) минеральных сред на теплообменную поверхность.*

*Ключевые слова: теплообмен, покрытия, минеральные среды, камера сгорания, сопло, голографические интерферограммы, теплозащита.*

**Введение.**

В последние десятилетия проблема защиты от высоких температур становится все более актуальной, особенно в контексте развития авиации, космических технологий, энергетики и других отраслей, где воздействие экстремальных температур неизбежно. В условиях этих технологических процессов необходимо использовать материалы, которые не только эффективно защищают от перегрева, но и обладают высокой устойчивостью, долговечностью и экологичностью. Природные материалы становятся ключевыми в разработке современных покрытий для защиты от высоких температур, сочетая традиции и инновации.

В работах [1; 2] представлено численное решение нелинейного обыкновенного дифференциального уравнения сложной задачи теплообмена и гидродинамики материаловедения с учетом запыленной жидкости в магнитном поле в присутствии теплового излучения. Такая проблема имеет место при создании капиллярно-пористых покрытий в сверхзвуковом высокотемпературном факеле и для ее решения актуальным является проведение эксперимента с привлечением оптических методов, так как весьма затруднительно получить даже теоретически распределение температуры, скорости, концентрации частиц в пограничном слое вблизи наносимого напылением покрытия.

В работе [3] как и в работах [1; 2] проведен термический анализ гидродинамики проводящей запыленной жидкости в пористой среде при наличии неоднородного источника. Графическое отображение полученного численного решения иллюстрирует влияние различных параметров для управления потоком. Магнитный и пористый параметры, параметр источника нагрева, параметр взаимодействия жидкости и частиц на распределение скорости и температуры как жидкой, так и пылевой фаз. Подобная задача имеет место при создании капиллярно-пористых покрытий в случае напыления порошка сверхзвуковой высокотемпературной струей. Она является настолько сложной, что требует проведения целенаправленного эксперимента по определению термических напряжений сжатия, растяжения и плавления в капиллярно-пористых покрытиях, которое будет эффективно с привлечением оптических методов и позволит прогнозировать развитие трещин и срока службы покрытий.

**Материалы и методы.**

Для исследования теплообмена в покрытиях из крепких минеральных сред использовался метод голографической интерферометрии (рис. 1). В опытах измерялись тепловые потоки, температуры, расходы, давления потоков жидкости и газа. Методика измерения рассматривалась в работах [4; 5].

Приведем интерференционную картину пористого покрытия, выполненного из вязкой породы (туфа) с пористостью  $\varepsilon = 30\%$ . Улучшение теплозащиты КПП (капиллярно-пористых покрытий) происходит за счет структурных градиентов температур. Синтез порошков минеральных сред, полученных в фокусах эллиптических цилиндров [4; 5], либо за счет ударных процессов и структурной детонации, дает неоспоримые преимущества в создании покрытий с градиентной наноструктурой.

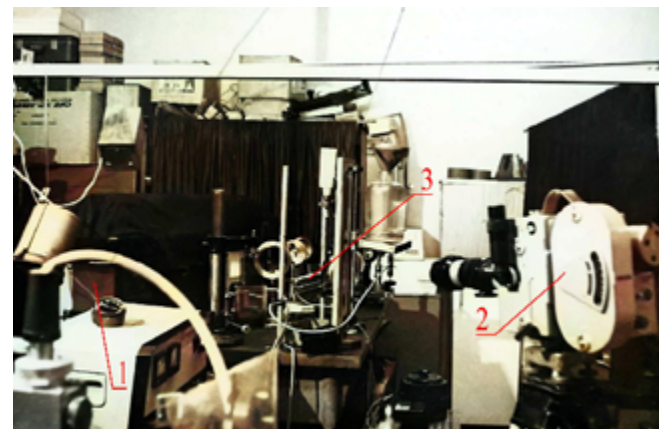


Рисунок 1 – Голографический стенд для исследования процессов теплообмена [4]:

1 – лазер; 2 – кинокамеру СКС-1М; 3 – пористый элемент

Такие материалы имеют высокие механические свойства, в них сочетается синергические преимущества прочности и пластичности, деформационное упрочнение, повышенное сопротивление растрескиванию, разрушению и усталости. Структурные термические градиенты создают градиенты термических напряжений и деформаций (см. рис. 2).

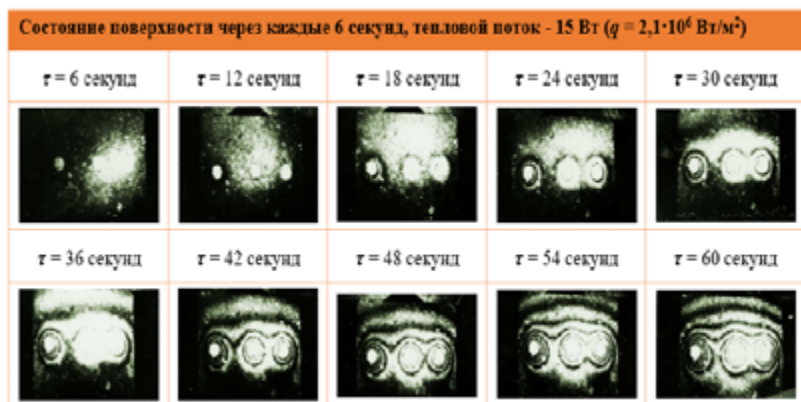


Рисунок 2 – Голографические интерферограммы покрытия из туфа

Градиентная наноструктура природных материалов создается в исследуемых КПП, что увеличивает отвод критических и предельных удельных тепловых потоков, когда . Градиентные КПП имеют радиальное направление.

Градиент температур управляет КПП, теплотехническими свойствами, термическими напряжениями, деформациями и перемещениями частиц в покрытии и создает синергическое усиление в градиентном природном материале. Природное покрытие вызывает деформации подложки при температурах покрытия, когда термические напряжения небольшие из-за прилипания либо затвердевания покрытия. Подложка будет воспринимать опасные растягивающие напряжения ораст.

Может быть и другая ситуация. Устойчивость покрытий из минеральной среды связана со сменой растягивающих и сжимающих напряжений, что нами показано при решении термоупругой задачи [5]. Если окажется, что  $\alpha$  покрытия больше, чем у подложки, то сменится знак термического напряжения. Поэтому, можно подобрать близкие значения  $\alpha$  для покрытия и подложки. Например, кварц, перпендикулярный к основанию оси, имеет  $\alpha = 1,37 \cdot 10^{-5}$  К<sup>-1</sup>, такая порода, как мрамор имеет  $\alpha = 1,3 \cdot 10^{-5}$  К<sup>-1</sup> (коэффициент линейного расширения). В общем случае имеем достаточно большой выбор не только величины  $\alpha$ , но и величины  $\lambda$ . Пределы изменения горных пород приведены в таблице 1.

Таблица 1 – Пределы изменения горных пород

$\lambda, \text{Вт}/(\text{м} \cdot \text{К})$	0,2 ÷ 12
$\alpha, \text{К}^{-1}$	$(0,2 \div 10) \cdot 10^{-5}$

Из исследованных горных пород гранит имеет низкое значение  $\lambda = (2,2 \div 4,1)$  Вт/(м·К), а значение  $\alpha = (0,6 \div 0,9) \cdot 10^{-5}$  К<sup>-1</sup>. Если будут иметь иные случаи, то можно воспользоваться быстрым охлаждением покрытия, которое быстро будет затвердевать с получением реакционно-отверждаемых покрытий (см. рис. 3).

Дожигание топлива (керосин) производилось на преграде (покрытии). Коэффициент избытка окислителя  $\alpha < 1$ , сопло горелки – укороченное, процесс сжигания – детонационный. Процесс дожигания может улучшаться до двух-шести раз. Окислитель добавляется струей на покрытие, горючее в струе – с избытком. Максимальные удельные потоки на преграде от (2 до 20) · 10<sup>6</sup> Вт/м<sup>2</sup>.

Для давления газа в камере сгорания горелки 0,5 МПа как и на покрытии частота колебания давления в камере составляет  $\approx (500 \div 600)$  Гц, а на покрытии (преграде) снижается до 200 Гц. Это позволяет иметь наиболее интенсивный процесс напыления покрытия и до минимума снизить возможный процесс его разрушения. За счет сверхзвуковой скорости потока напыление может происходить без плавления частиц порошка.

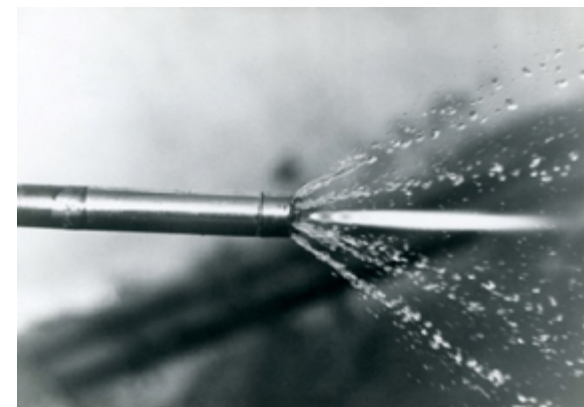


Рисунок 3 – Детонационный факел термоинструмента с  $d_{кр} = 4 \cdot 10^{-3}$  м. Смесь керосин-кислород. Система охлаждения – комбинированная. Выброс воды на поверхность носит технологическое значение

Безразмерная длина струи  $z$ , где  $z$  – абсцисса струи (от среза сопла до преграды);  $r_0$  – радиус струи на срезе сопла. За максимальное значение коэффициента теплоотдачи от струи к покрытию для одного из режимов примем  $\alpha_1 = 1000 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К})$ . Текущим значением является коэффициент теплоотдачи конвекцией  $\alpha$  от пограничного слоя газа в пятне растекания струи к поверхности покрытия.

По длине участка «бочек» струи теплообмен уменьшается, поскольку пограничный слой газа неустойчивый, происходит частичный отрыв его от поверхности нагрева в результате резкого колебания давления в потоке за волной при встрече струи с покрытием этим участком.

#### Результаты и обсуждение.

Исследования проводились для покрытий, выполненных из гранита, туфа, кварца и мрамора. Сравнение осуществлялось с металлами (медь и нержавеющая сталь). Кроме предельных тепловых потоков определялись предельные напряжения растяжения и сжатия, удельная энергия разрушения покрытия. Предельные области тепловых нагрузок для покрытия из гранита в координатах  $q = f(\delta, \tau)$ , представлены на рисунке 4.

В качестве примера для  $q = 0,2 \cdot 10^7 \text{ Вт}/\text{м}^2$  и  $\delta_{1,2,3} = 0,2; 0,5; 1 \cdot 10^{-3} \text{ м}$  оценим время полета частиц гранитного порошка  $\tau_{1,2,3} = 0,07; 0,2; 0,4 \text{ с}$ . Гранулометрический состав «шелухи» определялся на сите в интервале  $(0,1 \div 0,5) \cdot 10^{-3} \text{ м}$ . Сравнительная оценка структур и покрытий показала их преимущества перед тонкопленочными испарителями, тепловыми трубами и кипением в большом объеме на гладкой поверхности [4].

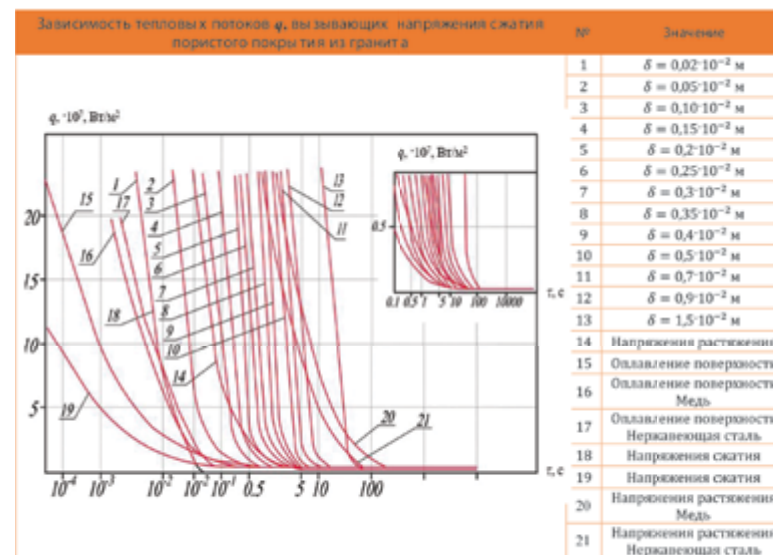


Рисунок 4 – Предельные области тепловых нагрузок для покрытия из гранита

Напыление покрытий в трубе, в которой имеется поток газа с  $M \leq 0,9$ , с диаметром  $d = \text{const}$  и без внешних воздействий, для ламинарного движения ( $= 102 \div 2 \cdot 103$ ) (камера сгорания):

средний коэффициент трения

$$C_f = \frac{\xi}{4} = \frac{16}{Re_d},$$

$$Re_d = \frac{W_{cp} \cdot d}{\nu},$$

$$\xi = \frac{64}{Re_d}.$$

где  $\xi$  – коэффициент сопротивления;  $\nu$  – коэффициент кинетической вязкости,  $\text{м}^2/\text{с}$ ;  $W_{cp}$  – средняя скорость по сечению трубы,  $\text{м}/\text{с}$ .

Число Нуссельта  $Nu = 3,65$ ;  $Nu = \frac{\alpha \cdot d}{\lambda}$ ,

где  $\alpha$  – коэффициент теплоотдачи, Вт/(м<sup>2</sup> · К);  $T_{ст} = \text{const}$ ;  $\lambda$  – коэффициент теплопроводности, Вт/(м · К);  $q$  – удельный тепловой поток, Вт/м<sup>2</sup>;  $T_{ст}$  – средняя температура жидкости за рассматриваемым сечением в случае ее адиабатного перемешивания.

$$\alpha = \frac{q}{T_{см} - T_{ст}};$$

Число Стэнтона

$$\frac{\alpha}{\rho \cdot c_p \cdot W_{cp}};$$

$$St = \frac{\xi}{8} = 0,396 \cdot Re^{-\frac{1}{4}};$$

$$Nu_d = 0,0396 \cdot Re_d^{0,75} \cdot Pr.$$

Для турбулентного движения ( $Re_d = 5 \cdot 10^3$  ч  $10^7$ ):

$$\xi = 0,316 \cdot Re_d^{-0,25},$$

$$C_f = 0,0791 \cdot Re_d^{-0,25},$$

$$Re_d = (2,1 \dots 100) \cdot 10^3.$$

Для участка трубы, где газ движется со сверхзвуковой скоростью и режим течения – турбулентный, имеем [6]:

$$Nu = 0,022 \cdot Re^{0,8} Pr^{0,43} \cdot \left(\frac{T_r}{T_{ст}}\right)^{0,42} \cdot \varepsilon_l,$$

где:  $Nu = \frac{\alpha \cdot d}{\lambda}$ ;  $Re = \frac{W_{cp} \cdot d}{\nu}$ ;  $Pr$  – число Прандтля,  $Pr = \frac{\nu}{\alpha}$ ,  $\alpha$  – коэффициент температуропроводности, м<sup>2</sup>/с;  $T_r$  – средняя термодинамическая температура газа в данном сечении, К;  $T_{ст}$  – средняя температура стенки, К.

Если турбулентный пограничный слой начинается от входного сечения трубы  $x = 0$ , то для  $\frac{x}{d} < 15$ ,  $\varepsilon_l = 1,38 \cdot \left(\frac{x}{d}\right)^{0,12}$ ; для  $\frac{x}{d} \geq 15$ ,  $\varepsilon_l = 1$ .

$T_r$

Физические константы берут при  $T_r$  в данном сечении трубы.

Интенсивность и форсировка теплообмена значительно повышаются за счет использования струй капельной жидкости с кипением на поверхности нагрева (на покрытии). Рассмотрим теплопередачу плоской затопленной струи с пластиной (покрытием) кривые 8, 9 (рис. 5). Скорость струи (водяной) на срезе сопла равна  $u_0$ , длина и ширина сечения струи равны  $l$  и  $b_0$  ( $\frac{l}{b_0} = 7$ ,  $b_0 = 2,4 \cdot 10^{-3}$  м,  $u_0 = 5$  и  $1$  м/с соответственно, Б. Н. Юдаев, И. Б. олодцов, 1982) [7].

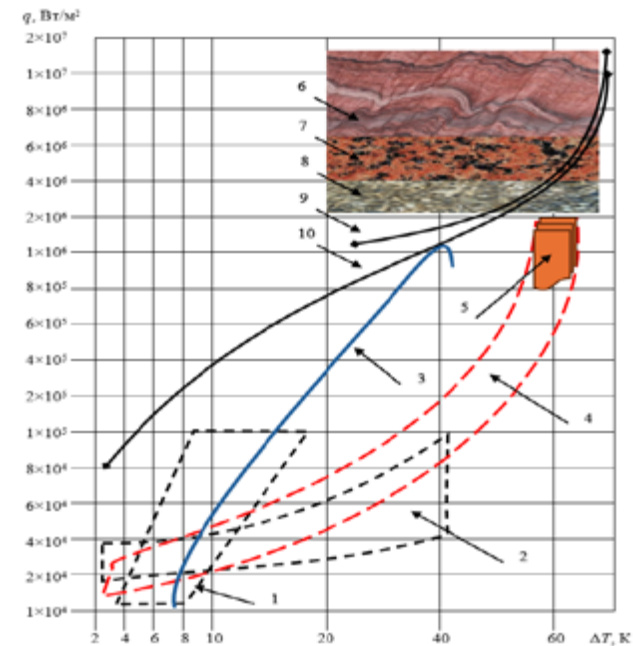


Рисунок 5 – Зависимость  $q = f(\Delta T)$ ,  $P = 0,1$  МПа

По данным Б.Н. Юдаева [8] величины  $\Delta T$  могут быть более 100 К (см. табл. 2 и рис. 5) в зависимости от тепловых нагрузок.

На рисунке 5 приняты обозначения: область 1 – работа тонкопленочных устройств; область 2 – теплопередающие аппараты [9]; кривая 3 – кипение на гладкой поверхности [10]; область 4 – наличие массовых сил [4]; область 5 – наличие массовых сил с учетом интенсификаторов [5]; область 6 – естественные материалы для кварцевых покрытий с кипением на поверхности; область 7 – естественные материалы для гранитных покрытий

с кипением на поверхности; область 8 – естественные материалы для тешенитных покрытий с кипением на поверхности; кривые 9 и 10 – плоские затопленные водяные струи с кипением на поверхности (кривая 9 – [7], кривая 10 – [8]).

Струя претерпевала фазовый переход на преграде (пластине), т.е. в окрестности критической точки. В данном способе охлаждения используется одновременно два наиболее интенсивных процесса: взаимодействие турбулентной струи с преградой и кипение охладителя на поверхности нагрева. Положение линий 8, 9 определено результатами эксперимента, а протяженность линий справа ограничена величиной  $q_{кр.}$  (см. табл. 2 и рис. 5).

Таблица 2 – Величины  $\Delta T$  при взаимодействии сверхзвуковой струи с преградой.

№ кривой	$q$ , Вт/м <sup>2</sup>	$\alpha$ , Вт/(м <sup>2</sup> ·К)	$\Delta T$ , К
8 (см. рис. 7)	$1 \cdot 10^6$	$5 \cdot 10^4$	20
8 (см. рис. 7)	$1 \cdot 10^7$	$9 \cdot 10^4$	110
8 (см. рис. 7)	$1 \cdot 10^8$	$5 \cdot 10^5$	200
9 (см. рис. 7)	$10^5$	$2 \cdot 10^4$	5
9 (см. рис. 7)	$10^6$	$3 \cdot 10^4$	35
9 (см. рис. 7)	$10^7$	$8 \cdot 10^4$	125
9 (см. рис. 7)	$5 \cdot 10^7$	$4 \cdot 10^5$	125

Как видно из рисунка 5, в случае струйного подвода охладителя достигаются высокие  $q_{кр.}$ , так как в зоне торможения струи имеет место высокая турбулентность (интенсивные пульсации), весьма тонкий пограничный слой, отрицательный градиент давления и активное разрушение паровой пленки.

#### Выводы

Разработанные покрытия расширяют отвод тепла. Достигнуто критическое состояние камер сгорания и сопел ( $2 \cdot 10^6$  Вт/м<sup>2</sup>). Горелки предназначены для эффективного и управляемого напыления покрытий из различных природных материалов за счет характеристик детонационного факела. В пределах изменения удельных тепловых потоков от факела горелки в покрытие ( $2 \cdot 10^6 \div 2 \cdot 10^7$ ) Вт/м<sup>2</sup> получено время полета частиц порошка, толщина покрытия, диаметр порошка, что подтверждено измерениями и оптическими наблюдениями (СКС-1М).

Выявлены основные параметры термоинструмента и покрытий, и исследованы пути управления процессами напыления. Волновая структура потока дополнительно интенсифицирует теплообмен, порождая турбулентность и отрыв потока от преграды. Данный механизм теплообмена

эффективен для процесса напыления частиц (порошков) минеральных сред на теплообменную поверхность.

#### СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1 **Ganesh, K. K., Giresha, B. J., Gorla, R.S.R.** Flow and heat transfer of dusty hyperbolic tangent fluid over a stretching sheet in the presence of thermal radiation and magnetic field // Int J Mech Mater Eng 13, 2 (2018). <https://doi.org/10.1186/s40712-018-0088-8>

2 **Ganesh, K. K., Giresha, B. J., Manjunatha, S. et al.** Effect of nonlinear thermal radiation on double-diffusive mixed convection boundary layer flow of viscoelastic nanofluid over a stretching sheet // Int J Mech Mater Eng 12, 18 (2017). <https://doi.org/10.1186/s40712-017-0083-5>

3 **Manjunatha, P. T., Giresha, B. J., Prasannakumara, B. C.** Thermal analysis of conducting dusty fluid flow in a porous medium over a stretching cylinder in the presence of non-uniform source/sink // Int J Mech Mater Eng 9, 13 (2014). <https://doi.org/10.1186/s40712-014-0013-8>

4 **Genbach, A.A., Bondartsev, D.Y., Beloev, H.I.** Studies of integrated natural capillary-porous coatings // 2021, IOP Conf. Ser.: Mater. Sci. Eng. 1032 012038. <https://doi.org/10.1088/1757-899X/1032/1/012038>

5 **Genbach, A.A., Bondartsev, D.Yu., Beloev, H.I., Genbach, N.A.** Boiling crisis in porous structures // Energy: 2022, 259, 125076. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2022.125076>

6 **Isachenko, V.P., Osipova, V.A., Sukomel, A.S.** Heat Transfer. - М., 1981, 424 P. (in Russ).

7 **Yudaev, B.N., Molodtsov, I.B.** Heat exchange of an impact jet of a droplet liquid with a phase transition on a barrier // Thermophysics and hydrogasodynamics of boiling and condensation processes: Proc. of All-Union Conf. Riga. 1982. Т. 1. P. 213-232. (in Russ).

8 **Yudaev, B.N., Shanin, Yu.I.** Heat exchange at interaction of a supersonic jet with an obstacle // Heat and Mass Transfer - VII: Collection. Minsk. 1984. Т. 1. part 2, P. 150-158. (in Russ).

9 **Kimihide, O., Hosei, N.** Investigation on liquid-vapor interface behavior in capillary evaporator for high heat flux loop heat pipe // International Journal of Thermal Sciences. Volume 140, June 2019, Pages 530-538. <https://doi.org/10.1016/j.ijthermalsci.2019.03.008>

10 **Chang, Y.H., Ferng, Y.M.** Experimental investigation on bubble dynamics and boiling heat transfer for saturated pool boiling and comparison data with previous works. Applied Thermal Engineering // Volume 154, 25 May 2019, Pages 284-293. <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2019.03.092>

Поступило в редакцию 25.01.25  
Поступило с исправлениями 12.02.25  
Принято в печать 10.03.25

A. A. Genbach<sup>1</sup>, \*D. Yu. Bondartsev<sup>2</sup>

<sup>1,2</sup>Almaty University of Power Engineering and Telecommunications

named after G. Daukeev, Republic of Kazakhstan, Almaty

Received 25.01.25

Received in revised form 12.02.25

Accepted for publication 10.03.25

## STUDY OF HEAT TRANSFER IN COATINGS MADE OF STRONG MINERAL MEDIA

*Thermal loads for cooling system with natural material coatings are investigated. The conditions of material spraying on the heating surface are determined. The research has implications for the thermal protection of equipment. Two most intensive processes are used simultaneously in the cooling method: interaction of turbulent jet with the barrier and boiling of the coolant on the heating surface. Devices for carrying out spraying of coatings by detonation high-temperature flares have been developed. The method of holographic interferometry and high-speed filming was used in the research. Heat fluxes, temperatures, flow rates, pressures of liquid and gas streams were measured in the experiments. Fabrication of coatings from natural materials can divert higher critical loads and stabilize the surface control process. The characteristics of torches for generation of supersonic high-temperature detonation flares during spraying of coatings from powders of natural materials were selected. Due to supersonic flow velocity, spraying occurs without melting of powder particles. The oxidizer excess coefficient varied in the range of  $0,3 \div 0,8$ ; the jet plume temperature ( $3500 \div 850$ ) °C; the jet length ( $0 \div 0,16$ ) m; the jet radius  $(3 \div 10) \cdot 10^{-3}$  m. The proposed heat exchange mechanism is effective for the process of spraying particles (powders) of mineral media on the heat exchange surface.*

*Key words: heat transfer, coatings, mineral media, combustion chamber, nozzle, holographic interferograms, heat protection.*

A. A. Genbach<sup>1</sup>, \*D. Yu. Bondartsev<sup>2</sup>

<sup>1,2</sup>Г. Даукеев атындағы Алматы Энергетика және Байланыс Университеті, Қазақстан Республикасы, Алматы қ.

25.01.25 ж. баспаға түсті.

12.02.25 ж. түзетулерімен түсті.

10.03.25 ж. басып шығаруға қабылданды.

## КҮШТІ МИНЕРАЛДЫ ОРТАДАН ЖАСАЛҒАН ЖАБЫНДАРДАҒЫ ЖЫЛУ АЛМАСУДЫ ЗЕРТТЕУ

*Табиғи материалдармен қапталған салқындату жүйесіне арналған жылу жүктемелері зерттелді. Материалды жылыту бетіне бүрку шарттары анықталды. Зерттеулер жабықты жылыудан қорғау үшін маңызды. Салқындату әдісі бір уақытта ең қарқынды екі процесті қолданады: турбулентті ағынның тосқауылмен әрекеттесуі және салқындатқыштың қыздыру бетінде қайнауы. Детонациялық Жоғары температуралы алаулармен жабындарды тозаңдандыруға арналған құрылғылар әзірленді. Зерттеулерде голографиялық интерферометрия және жылдамдық түсіру әдісі қолданылды. Тәжірибелер жылу ағындарын, температураны, шығындарды, Сұйықтықпен газ ағынның қысымын өлшеді. Табиғи материалдардан жабындар жасау жоғары сыни жүктемелерді алып тастауға және бетті басқару процесін тұрақтандыруға мүмкіндік береді. Табиғи материалдардың ұнтақтарынан жасалған жабындарды бүрку кезінде дыбыстан жоғары температуралы детонациялық алауларды генерациялау үшін оттықтардың сипаттамалары таңдалды. Ағынның дыбыстан жоғары жылдамдығына байланысты бүрку ұнтақ бөлшектерін ерітпей жүреді. Артық тотықтырғыштың коэффициенті  $0,3 \div 0,8$  аралығында болды; реактивті алау температурасы ( $3500 \div 850$ ) °C; ағынның ұзындығы ( $0 \div 0,16$ ) м; ағынның радиусы  $(3 \div 10) \cdot 10^{-3}$  мұсынылған жылу алмасу механизмі минералды ортаның бөлшектерін (ұнтақтарын) жылу алмасу бетіне бүрку процесінде тиімді.*

*Кілтті сөздер: жылу алмасу, жабындар, минералды орта, жану камерасы, саптама, голографиялық интерферограммалар, жылыудан қорғау.*



<https://doi.org/>

**А. Б. Ергалиев<sup>1</sup>, \*М. В. Ярославцев<sup>2</sup>, О. М. Талипов<sup>3</sup>,  
Н. А. Қалы<sup>4</sup>, А. Г. Сагинов<sup>5</sup>**

<sup>1, 2, 3, 4, 5</sup>Торайғыров университет, Республика Казахстан, г. Павлодар

<sup>1</sup>ORCID: <https://orcid.org/0009-0001-1315-2615>

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

<sup>3</sup>ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-8355-1769>

<sup>4</sup>ORCID: <https://orcid.org/0009-0001-1315-2615>

<sup>5</sup>ORCID: <https://orcid.org/0009-0005-0567-7189>

\*e-mail: [myaroslav54@gmail.com](mailto:myaroslav54@gmail.com)

## **ПОВЫШЕНИЕ ЭНЕРГЕТИЧЕСКОЙ ЭФФЕКТИВНОСТИ ЭЛЕКТРОПРИВОДА НАСОСА НЕФТЕПЕРЕКАЧИВАЮЩЕЙ СТАНЦИИ ПРИ ИСПОЛЬЗОВАНИИ ЧАСТОТНОГО РЕГУЛИРОВАНИЯ СКОРОСТИ**

*В работе рассматривается проблема повышения энергетической эффективности электропривода насоса нефтеперекачивающей станции с использованием частотного регулирования скорости. Одним из основных факторов, влияющих на эксплуатационные характеристики насосных установок, является оптимизация потребления электроэнергии, особенно при изменяющихся режимах работы. Традиционно насосы работают на постоянной скорости, что не всегда эффективно в условиях переменных нагрузок и различных технологических требований. Частотное регулирование позволяет адаптировать скорость вращения двигателя под текущие нужды, что снижает потери энергии и способствует улучшению показателей экономичности. В данной статье представлена математическая модель поддержания производительности магистрального насоса нефтеперекачивающей станции. Рассмотрены вопросы, связанные с повышением энергоэффективности электропривода насоса нефтеперекачивающей станции с использованием частотного регулирования. Авторами разработана модель электропривода насоса головной нефтеперекачивающей станции в среде Simulink. Приведены числовые значения вероятностной экономии электрической энергии за*

*счет уменьшения мощности электропривода магистрального насоса при помощи частотного регулирования скорости электродвигателя нефтеперекачивающей станции. В рамках работы проведен анализ существующих решений, направленных на снижение энергетических затрат при эксплуатации насосных станций. Кроме того, предлагается подход к моделированию работы насосной установки с частотным регулированием и анализу полученных данных. Результаты работы демонстрируют, что внедрение частотного регулирования скорости вращения электродвигателя насоса значительно снижает энергозатраты, улучшает эксплуатационные характеристики оборудования и позволяет достичь более стабильной работы насосной установки в условиях переменных нагрузок. Применение частотных преобразователей является эффективным решением для повышения энергетической эффективности насосных систем нефтеперекачивающих станций.*

*Ключевые слова: частотный регулятор, энергетическая эффективность, электропривод, производительность, магистральный насос, имитационная модель.*

### **Введение**

С ростом мировой экономики и населения планеты потребность в энергоресурсах резко выросла. Достаточно сказать, что за последние четверть века общее мировое энергопотребление увеличилось на 56%.

С развитием экономики Казахстана потребность в энергоресурсах только увеличивается. Основное потребление энергоресурсов в Казахстане приходится на сферу промышленности. 67% электроэнергии приходится на крупных промышленных потребителей.

В настоящее время энергоэффективность – главный тренд мировой экономики, который включает в себя все аспекты технологического развития, модернизации и диверсификации экономики, и самое главное – роста конкурентоспособности и эффективности экономики. Для нашей страны политический тренд энергоэффективности задан.

В стратегическом плане развития Республики Казахстан до 2025 года определена задача по снижению энергоемкости ВВП Казахстана не менее чем на 25 % к 2025 году. При этом, за период независимости энергоемкость ВВП Казахстана снизилась на 52%, когда за этот же период энергоемкость мировой экономики была снижена на 21% [1].

Практическая реализация подходов энергосбережения и энергоэффективности в электроэнергетической и в смежных отраслях имеют основополагающее значение для страны. К основным подходам

по данному направлению будут отнесены: проведение мероприятий по энергосбережению и повышению энергоэффективности с широким охватом секторов электроэнергетической отрасли для последующего перераспределения высвобождающихся в результате экономии и сокращения потерь ресурсов; создание устойчивых механизмов финансовой поддержки энергоэффективных проектов; усиление регулирования по вопросам повышения энергоэффективности по каждому сектору [1].

Основными потребителями электрической энергии в нефтетранспортном комплексе являются электроприводы нефтеперекачивающих насосов. В работах [2; 3; 4; 5; 6] предложен ряд мер по повышению энергоэффективности главных электроприводов нефтеперекачивающих станций. Применение электроприводов с частотным регулированием скорости позволит достичь значительной экономии электрической энергии [3].

Чтобы определить её величину и определить срок окупаемости мероприятий по реконструкции нефтеперекачивающих станций, авторами предложено исследовать режимы работы электропривода насоса на математической модели.

#### Материалы и методы

Для определения потребляемой электроприводом насоса мощности была разработана модель электропривода в среде имитационного моделирования Simulink [7; 8]. Общий вид модели показан на рисунке 3. Модель состоит из следующих подсистем: подсистема именуемая как «pump» и подсистема именуемая как «motor». В подсистеме «pump» 2 входных величины: это угловая скорость ротора  $\omega$  и напор насоса  $P$ . Выходными величинами подсистемы являются момент сопротивления двигателя  $M_{сопр}$ , фактическая производительность насоса  $Q$  и номинальная производительность насоса. Модель подсистемы представлена на рисунке 1. Между напором и производительностью имеется обратная зависимость: чем меньше напор, тем больше производительность насоса.

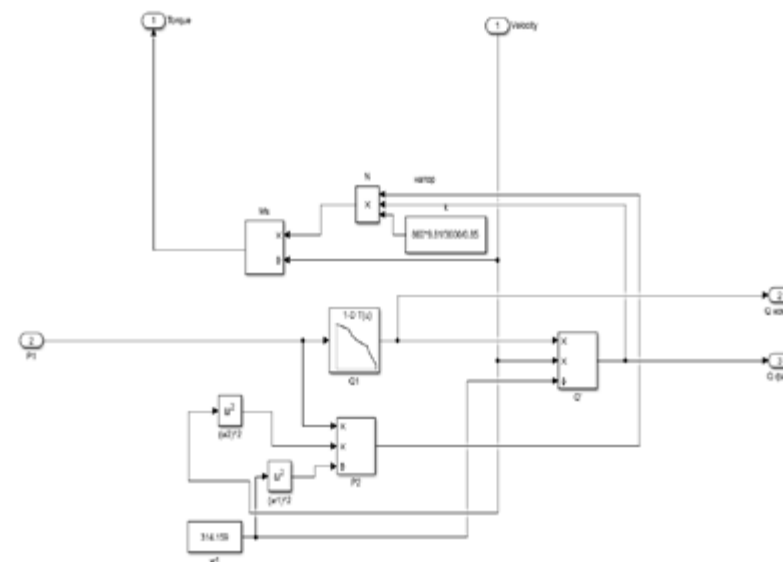


Рисунок 1 – Модель момента сопротивления насоса

В подсистеме «motor» (рис. 2) входными величинами, определяющими работу модели, являются э.д.с ротора  $E$ , номинальное напряжение статора  $U$ , частота вращения статора  $f$  и угол поворота ротора  $\alpha$ . Выходные величины: разность углов поворота между углом поворота магнитного поля статора и ротором двигателя  $d$ , момент двигателя  $M$ , угловая скорость статора.

Для нахождения момента эл.двигателя нужны следующие значения:

- э.д.с ротора;
- входное напряжение статора;
- разность углов поворота между углами поворота статора и ротора;
- сопротивление обмотки по оси  $d$ .

Момент электродвигателя определяется по формуле:

$$M_{эд} = \frac{E + U \cdot \sin d}{X_d}$$

Далее можем вычислить мощность двигателя по формуле:

$$P = M \cdot \omega$$

Для нахождения момента сопротивления насоса мы использовали подсистему «rimpr», о которой рассказывали выше при описании подсистемы.

Немаловажным компонентом при проектировании системы является момент инерции насоса. Момент инерции состоит из трех компонентов: это момент инерции рабочего колеса, момент инерции нефти и момент инерции электродвигателя. Итоговое вычисленное значение момента инерции насоса приведено ниже:

$$J = J_{\text{раб.колесо}} + J_{\text{нефти}} + J_{\text{дв}} = 0,735 + 1,57 + 93,75 = 96,055 \text{ кг} \cdot \text{м}^2$$

Для того чтобы вычислить угловую скорость вращения ротора двигателя нам необходимо для начала определить угловое ускорение для вращательного движения. Определим ускорение вращения двигателя с помощью формулы:

$$\varepsilon = \frac{M_{\text{дв}} - M_{\text{сопр}}}{J}$$

Дальше проинтегрировав ускорение получим угловую скорость вращения двигателя:

$$\omega = \int \varepsilon dt$$

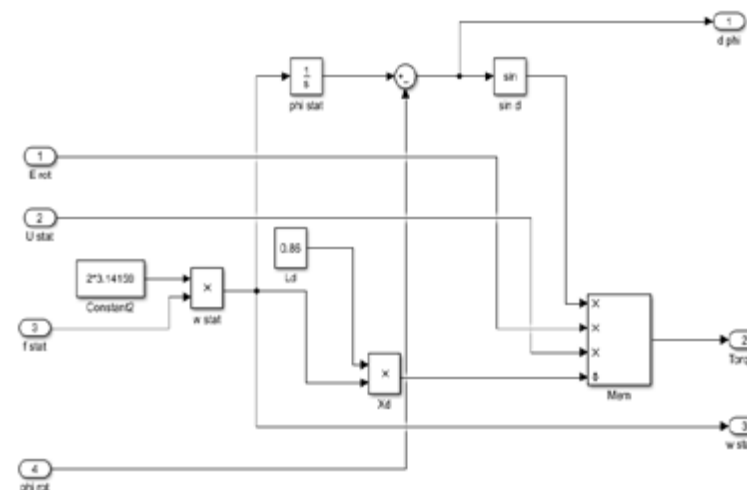


Рисунок 2 – Момент электрического двигателя насоса

Для построения модели и его исследования был выбран насос типа НМ 7000-210. Характеристики насоса взяты из каталога [9], характеристики электродвигателя СТД 5000-2 приняты по данным [10].

Общий вид системы управления приведен на рисунке 3. Целью системы управления является поддержание заданного расхода нефти. При постоянстве напора для этого необходимо стабилизировать скорость вращения электродвигателя. В модель введена обратная связь по скорости вращения ротора. Отклонение частоты вращения магнитного поля статора от расчетного значения корректируется при помощи ПИД-регулятора (рисунок 3). При создании модели была выполнена настройка регулятора с апериодическим фильтров в дифференциальной ветви, и получен апериодический переходный процесс при изменении задания по скорости вращения электропривода.

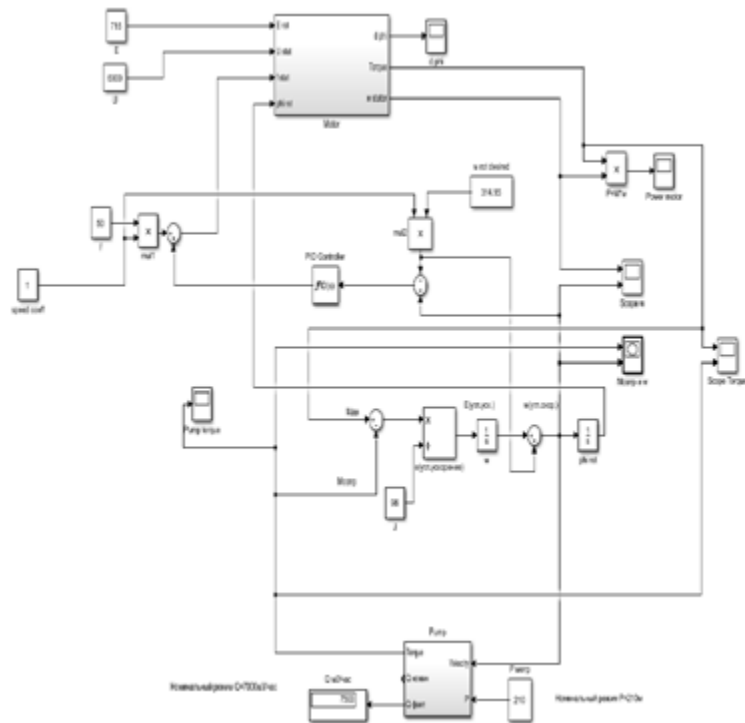


Рисунок 3 – Общая модель электропривода насоса

### Результаты и обсуждение

Для сокращения расхода энергии на работу нефтеперекачивающего насоса предложено использовать частотное управление скоростью его вращения. Для определения величины экономии энергии на модели были получены зависимости потребляемой электроприводом мощности от расхода нефти через насос для двух случаев: регулирования расхода путем изменения частоты вращения электродвигателя и регулирования расхода изменением напора при помощи регулятора давления. Полученные результаты представлены на рисунке 4.

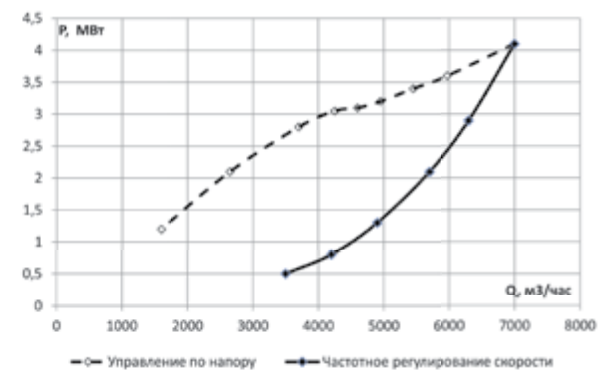


Рисунок 4 – Зависимость мощности привода насоса от его производительности при управлении по частоте и по напору

Как видно из рисунка 4, при снижении производительности насоса на 30% до 4900 м³/час потребляемая электроприводом насоса мощность составит 1,3 МВт при частотном регулировании и 3,2 МВт при дросселировании, то есть применение частотного регулирования скорости электропривода позволит достичь значительного сокращения потребления энергии.

### Выводы

Авторами разработана модель электропривода насоса головной нефтеперекачивающей станции в среде Simulink.

Особенностями предложенной модели являются: изменение скорости вращения вала с помощью частотного регулирования, тем самым достигается экономия энергопотребления электропривода насоса нефтеперекачивающей станции.

Установлено, что применение частотного регулирования скорости позволяет снизить потребляемую электроприводом мощность на 60% при снижении производительности насоса на 30%.

### СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1 Концепция развития электроэнергетической отрасли Республики Казахстан до 2035 года [Электронный ресурс]. – URL: <https://www.gov.kz/memleket/entities/energo/documents/details/349883?lang=ru&ysclid=m4basycr ss722623721>. – Загл. с экрана. – Дата обращения: 05.12.2024 г.

2 Gracheva, E.I., Tabachnikova, T.V., Gorlov, A.N. Estimating How the Start-Up of High-Voltage Ground Electric Drive of Oil Transfer Pump Impacts

the Oil Well Electric Motor Operation // Proceedings of International Ural Conference on Measurements, UralCon. – 2022. – P. 402 - 406. – DOI: 10.1109/UralCon54942.2022.9906716

3 **Lysenko, O.A., Simakov, A.V.** The scalar control mode optimization of a pump unit electric drive for oil transportation on a refinery // AIP Conference Proceedings. – 2022. – Vol. 2285. – Art. no. 050014. – DOI: 10.1063/5.0026689.

4 **Chernysheva, T.A., Anikin, V.V., Chernyshev, I.A., Chernyshev, A.Yu.** Variable speed electric drive of centrifugal pump in oil lifting plants // Bulletin of the Tomsk Polytechnic University, Geo Assets Engineering. – 2019. – Vol. 330. – Iss. 12. – P. 168 – 178. – DOI: 10.18799/24131830/2019/12/2417.

5 **Самоленков, С.В.** Обоснование энергосберегающих режимов работы нефтеперекачивающих центробежных насосов с регулируемым приводом диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук.– Национальный минерально-сырьевой университет «Горный». – Санкт-Петербург, 2014. – EDN: VLUQGF.

6 **Лазоренко, М.Ю., Геймур, В.О., Устинов, С.О.** Исследование режимов работы нефтеперекачивающей станции с частотно-регулируемым приводом насосных агрегатов // Новые технологии - нефтегазовому региону: материалы Международной научно-практической конференции. – 2016. – С. 56-59.

7 **Дьяконов, В. П., Пеньков, А. А.** MATLAB и Simulink в электроэнергетике : Справочник. – М.: Горячая Линия - Телеком, 2009. – 816 с.

8 **Герман-Галкин, С.Г.** Matlab & Simulink. Проектирование мехатронных систем на ПК. – М.: Корона-Век, 2011. – 368 с.

9 Центральный институт научно-технической информации и технико-экономических исследований по химическому и нефтяному машиностроению. Каталог центробежных нефтяных магистральных и подпорных насосов. – М.: НИИМАН. – 1973. – Изд. № 3785. – 20 с.

10 **Слодарж, М.И.** Режимы работы, релейная защита и автоматика синхронных электродвигателей. – М.: Энергия, 1977. – 215 с.

## REFERENCES

1 Концепсия razvitiya e`lektroe`nergeticheskoy otrasli Respubliki Kazaxstan do 2035 goda [Concept of development of energy sector in the republic of Kazakhstan] [E`lektronny`j resurs]. – URL: <https://www.gov.kz/memleket/entities/energo/documents/details/349883?lang=ru&ysclid=m4basycr ss722623721> . – Title from screen. – Date of access: 05.12.2024.

2 **Gracheva, E.I., Tabachnikova, T.V., Gorlov, A.N.** Estimating How the Start-Up of High-Voltage Ground Electric Drive of Oil Transfer Pump Impacts the Oil Well Electric Motor Operation // Proceedings of International Ural

Conference on Measurements, UralCon. – 2022. – P. 402 - 406. – DOI: 10.1109/UralCon54942.2022.9906716

3 **Lysenko, O.A., Simakov, A.V.** The scalar control mode optimization of a pump unit electric drive for oil transportation on a refinery // AIP Conference Proceedings. – 2022. – Vol. 2285. – Art. no. 050014. – DOI: 10.1063/5.0026689.

4 **Chernysheva, T.A., Anikin, V.V., Chernyshev, I.A., Chernyshev, A.Yu.** Variable speed electric drive of centrifugal pump in oil lifting plants // Bulletin of the Tomsk Polytechnic University, Geo Assets Engineering. – 2019. – Vol. 330. – Iss. 12. – P. 168 – 178. – DOI: 10.18799/24131830/2019/12/2417.

5 **Samolenkov, S.V.** Obosnovanie e`nergoberegayushhix rezhimov raboty` neftepererekachivayushhix centrobezhn`y`x nasosov s reguliruemy`m privodom [Determination of energy saving regimes of centrifugal oil pumps with regulated drives], cand of science (tech.) thesis. – State mineral resources university ‘Gorny`j’. – Sankt-Peterburg, 2014. – EDN: VLUQGF.

6 **Lazorenko, M.Yu., Gejmur, V.O., Ustinov, S.O.** Issledovanie rezhimov raboty` neftepererekachivayushhej stancii s chastotno-reguliruemy`m privodom nasosny`x agregatov [Investigation of load regimes of frequency controlled oil pump aggregate drives] // Novy`e tehnologii - neftegazovomu regionu [New technologies for oil and gas region]: proceedings of international scientific and practical conference. – 2016. – P. 56-59.

7 **D`yakonov, V.P., Pen`kov, A.A.** MATLAB i Simulink v e`lektroe`nergetike [MATLAB and Simulink in power engineering]: Handbook. – Moscow: Goryachaya Liniya - Telekom, 2009. – 816 p.

8 **German-Galkin, S.G.** Matlab & Simulink. Proektirovanie mexatronny`x sistem na PK [Matlab & Simulink. Design of mechatronic systems with PC]. – Moscow: Korona-Vek, - 2011. – 368 p.

9 Central`ny`j institut nauchno-texnicheskoy informacii i texniko-e`konomicheskix issledovaniy po ximicheskomu i neftyanomu mashinostroeniyu. Katalog centrobezhn`y`x neftyany`x magistral`ny`x i podporny`x nasosov [Central institute of scientific and technical information and economical research on chemical and oil mechanical engineering]. – Moscow: NIIMASH, 1973. – Vol. № 3785. – 20 p.

10 **Slodartzh, M.I.** Rezhimy` raboty`, relejnaya zashita i avtomatika sinxronny`x e`lektrdvigatel`ej [Load regimes, automation and protection of synchronous electric motors]. – Moscow: E`nergiya, 1977. – 215 p.

Поступило в редакцию 19.12.24

Поступило с исправлениями 14.02.25

Принято в печать 10.03.25

А. Б. Ергалиев<sup>1</sup>, \*М. В. Ярославцев<sup>2</sup>, О. М. Талипов<sup>3</sup>,

Н. А. Қалы<sup>4</sup>, А. Г. Сагинов<sup>5</sup>

<sup>1, 2, 3, 4, 5</sup>Торайғыров университет, Қазақстан Республикасы, Павлодар қ.

19.12.24 ж. баспаға түсті.

14.02.25 ж. түзетулерімен түсті.

10.03.25 ж. басып шығаруға қабылданды.

## ЖИЛІК ЖЫЛДАМДЫҒЫН РЕТТЕУ АРҚЫЛЫ МҰНАЙ АЙДАУ СТАНЦИЯ СОРҒЫСЫНЫҢ ЭЛЕКТР ЖЕТЕГІНІҢ ЭНЕРГИЯ ТИІМДІЛІГІН АРТТЫРУ

Бұл жұмыста жылдамдықты жиілікті реттеуді қолдана отырып, мұнай айдау станциясының сорғысының электр жетегінің энергетикалық тиімділігін арттыру мәселесі қарастырылды. Сорғы қондырғыларының жұмысына әсер ететін негізгі факторлардың бірі-электр энергиясын тұтынуды оңтайландыру, әсіресе жұмыс режимдері өзгерген кезде. Дәстүр бойынша, сорғылар тұрақты жылдамдықта жұмыс істейді, бұл айнымалы жүктемелер мен әртүрлі технологиялық талаптар жағдайында әрқашан тиімді бола бермейді. Жиілікті реттеу қозғалтқыштың айналу жылдамдығын ағымдағы қажеттіліктерге бейімдеуге мүмкіндік береді, бұл энергия шығынын азайтады және тиімділік көрсеткіштерін жақсартуға көмектеседі. Бұл мақалада мұнай айдау станциясының магистральдық сорғысының өнімділігін сақтаудың математикалық моделі келтірілген. Жиілікті реттеуді пайдалана отырып, мұнай айдау станциясы сорғысының электр жетегінің энергия тиімділігін арттыруға байланысты мәселелер қаралды. Авторлар Simulink ортасында бас мұнай айдау станциясының сорғысының электр жетегінің моделін жасады. Мұнай айдау станциясының электр қозғалтқышының жылдамдығын жиілікті реттеу арқылы магистральдық сорғының электр жетегінің қуатын азайту арқылы электр энергиясын ықтимал үнемдеудің сандық мәндері келтірілген. Жұмыс шеңберінде сорғы станцияларын пайдалану кезінде энергетикалық шығындарды азайтуға бағытталған қолданыстағы шешімдерге талдау жүргізілді. Сонымен қатар, жиілікті реттейтін сорғы қондырғысының жұмысын модельдеу және алынған деректерді талдау әдісі ұсынылды. Жұмыс нәтижелері сорғының электр қозғалтқышының айналу жылдамдығын жиілікті реттеуді енгізу энергия шығынын айтарлықтай төмендететінін, жабдықтың пайдалану сипаттамаларын жақсартатынын және ауыспалы жүктемелер жағдайында сорғы қондырғысының тұрақты

жұмысына қол жеткізуге мүмкіндік беретінін көрсетеді. Жиілік турлендіргіштерін қолдану мұнай айдау станцияларының сорғы жүйелерінің энергетикалық тиімділігін арттырудың тиімді шешімі болып табылады.

Кілтті сөздер: жиілікті реттегіш, энергия тиімділігі, электр жетегі, өнімділік, магистральдық сорғы, математикалық модель.

А. В. Yergaliyev<sup>1</sup>, \*М. V. Yaroslavtsev<sup>2</sup>, О. М. Talipov<sup>3</sup>,

Н. А. Kaly<sup>4</sup>, А. G. Saginov<sup>5</sup>

<sup>1, 2, 3, 4, 5</sup>Toraighyrov University, Republic of Kazakhstan, Pavlodar

Received 19.12.24

Received in revised form 14.02.25

Accepted for publication 10.03.25

## INCREASING THE ENERGY EFFICIENCY OF THE ELECTRIC DRIVE OF THE OIL PUMPING STATION'S PUMP WITH FREQUENCY SPEED CONTROL

In this paper, the problem of increasing the energy efficiency of the electric drive of the pump of an oil pumping station using frequency speed control is considered. One of the main factors affecting the performance of pumping units is the optimization of electricity consumption, especially under changing operating conditions. Traditionally, pumps operate at a constant speed, which is not always effective in conditions of variable loads and various technological requirements. Frequency control allows you to adapt the engine rotation speed to current needs, which reduces energy losses and improves efficiency. This article presents a mathematical model for maintaining the performance of the main pump of an oil pumping station. The issues related to improving the energy efficiency of the electric drive of the pump of an oil pumping station using frequency control are considered. The authors have developed a model of the electric pump drive of the head oil pumping station in the Simulink environment. Numerical values of the probabilistic saving of electric energy due to a decrease in the power of the electric drive of the main pump by means of frequency control of the speed of the electric motor of the oil pumping station are given. As part of the work, an analysis of existing solutions aimed at reducing energy costs during the operation of pumping stations was carried out. In addition, an approach to modeling the operation of a frequency-controlled pumping unit and analyzing the data obtained is proposed. The results of the work

*demonstrate that the introduction of frequency control of the rotation speed of the pump motor significantly reduces energy consumption, improves the operational characteristics of the equipment and allows for more stable operation of the pumping unit under variable loads. The use of frequency converters is an effective solution to increase the energy efficiency of pumping systems of oil pumping stations*

*Keywords: frequency controller, energy efficiency, electric drive, performance, main pump, mathematical model.*

МРНТИ 44.41.35

<https://doi.org/>

**\*А. Т. Ергалиева<sup>1</sup>, Л. А. Авдеев<sup>2</sup>, Ш. З. Телбаева<sup>3</sup>,  
С. В. Войткевич<sup>4</sup>, В. А. Иванов<sup>5</sup>**

<sup>1,2,3,4,5</sup>Карагандинский технический университет имени Абылқаса Сағинова, Республика Казахстан, г. Караганда

<sup>1</sup>ORCID: <https://orcid.org/0009-0008-5408-1922>

<sup>2</sup>ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-4720-5823>

<sup>3</sup>ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-6208-4113>

<sup>4</sup>ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-4267-3468>

<sup>5</sup>ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-2811-7908>

\*e-mail: [aizhan432@mail.ru](mailto:aizhan432@mail.ru)

## **ВЛИЯНИЕ СОЛНЕЧНОЙ АКТИВНОСТИ НА ЭФФЕКТИВНОСТЬ СОЛНЕЧНЫХ ПАНЕЛЕЙ В РАЗЛИЧНЫХ РЕГИОНАХ КАЗАХСТАНА**

*В данной статье рассматриваются процессы, связанные с анализом солнечной активности и радиации в различных регионах Казахстана и их влиянием на эффективность солнечных панелей. Целью исследования является оценка уровня солнечного излучения и количества солнечных дней в разных городах страны для выявления трендов и условий, важных для оптимизации использования солнечной энергии. В работе подробно описаны этапы исследования, включая сбор данных о солнечной активности с 2019 по 2023 годы, а также анализ этих данных для оценки изменений в солнечной активности и её влияния на производительность солнечных систем. Проведённые наблюдения помогают лучше понять природные колебания в интенсивности солнечного излучения и их связь с климатическими особенностями различных регионов, что может быть полезным при планировании солнечных установок. Полученные результаты подчеркивают важность выбора местоположения для установки солнечных систем и адаптации технологий в зависимости от региональных климатических условий. Установлено, что в некоторых районах Казахстана солнечные панели могут работать с большей эффективностью благодаря более стабильным уровням солнечного излучения, что особенно ценно для проектирования новых солнечных*

*ферм. Данные исследования могут способствовать формированию стратегий по внедрению и оптимизации солнечных технологий в Казахстане, что, в свою очередь, будет способствовать развитию устойчивых источников энергии. Таким образом, результаты работы могут быть полезны не только для локального энергетического планирования, но и для расширения применения возобновляемых источников энергии в Казахстане, способствуя улучшению экологической обстановки и поддержанию энергетической независимости страны.*

*Ключевые слова: Солнечные панели, эффективность, возобновляемая энергия, экспериментальные данные, погодные условия, солнечная энергетика.*

### **Введение**

В настоящее время возобновляемые источники энергии, включая солнечную, занимают важное место в глобальной энергетической системе. Солнечная энергия, как один из наиболее доступных и чистых видов энергии, представляет собой значительный потенциал для стран с высоким уровнем солнечного излучения, таких как Казахстан. Казахстан обладает разнообразными климатическими условиями и значительными солнечными ресурсами, что создает уникальные возможности для использования солнечных панелей.[1]

Существующие исследования показывают, что эффективность солнечных панелей напрямую зависит от уровня солнечной активности, который может значительно варьироваться в зависимости от географического положения и климатических условий региона. Важность понимания этих факторов не может быть переоценена, так как они влияют на производительность солнечных систем и определяют целесообразность их установки в определенных регионах.[2]

В данной работе рассматриваются процессы, связанные с анализом солнечной активности и радиации в различных городах Казахстана. Основное внимание уделяется оценке уровня солнечного излучения и количества солнечных дней за период с 2019 по 2023 годы, что позволяет выявить тренды и условия, способствующие оптимизации использования солнечной энергии. Данные исследования помогают определить наиболее перспективные регионы для установки солнечных панелей и обосновать необходимость адаптации технологий в зависимости от климатических условий.

### **Материалы и методы**

Данное исследование основано на анализе солнечной активности и радиации в различных регионах Казахстана с использованием данных,

собранных за период с 2019 по 2023 годы. Для достижения целей исследования был проведен комплексный анализ, включающий несколько ключевых этапов.

В рамках первого анализа была собрана информация о солнечной активности в различных городах Казахстана. Эти данные помогли оценить уровень солнечного излучения в разных регионах страны, что позволяет сравнить условия для установки солнечных панелей в зависимости от географического положения.

Во втором анализе исследовались данные о солнечной радиации, собранные в течение 2023 года. На основе этих данных был рассчитан оптимальный угол наклона для солнечных панелей, что является критически важным для повышения их эффективности. Кроме того, в рамках анализа собранных данных о солнечной радиации был проведен статистический анализ, который позволил выявить тренды и закономерности, а также оценить, как они влияют на производительность солнечных систем.

### **Результаты и обсуждение**

Для анализа погоды в Казахстане были собраны данные о количестве солнечных дней в различных городах страны. Эти данные были получены с сайта Gismeteo [3] и представлены в двух таблицах, которые позволяют проанализировать погодные условия по месяцам, а также сравнить эти показатели за последние пять лет (с 2019 по 2023 годы).

Первая таблица представляет данные о количестве солнечных дней в различных городах Казахстана за 2023 год. Данные по месяцам показывают значительные различия в количестве солнечных дней в зависимости от региона и времени года.

Таким образом, данные первой таблицы демонстрируют, что эффективность использования солнечных панелей в Казахстане сильно зависит от региона [4]. Регионы с большим количеством солнечных дней, такие как Актау и Туркестан, имеют высокий потенциал для генерации солнечной энергии круглый год. В то же время, в городах с меньшим количеством солнечных дней необходимо внедрять решения для накопления энергии и повышения эффективности использования солнечных батарей в условиях нестабильной инсоляции [5].

В таблице 2 показано количество солнечных дней за последние пять лет (2019-2023) в тех же городах по всему Казахстану. Эти данные дают представление о том, как годовое количество солнечных дней менялось с течением времени, что может помочь выявить тенденции в солнечном воздействии и возможные климатические сдвиги в этих регионах.



Таблица 2 – Количество солнечных дней в разных городах Казахстана за 5 лет

Количество солнечных дней в разных городах Казахстана за 5 лет					
	2019	2020	2021	2022	2023
Караганда	136	128	138	128	103
Астана	131	124	137	121	123
Алматы	184	181	190	155	146
Актобе	122	127	136	116	127
Атырау	144	186	174	173	154
Усть-Каменогорск	152	142	127	142	123

Продолжение таблицы 2

Тараз	193	198	202	180	168
Уральск	111	127	115	98	197
Костанай	123	129	157	132	84
Кызылорда	193	216	219	203	161
Актау	197	219	226	212	219
Павлодар	124	122	117	121	164
Петропавловск	105	117	137	118	106
Туркестан	221	234	246	206	204
Шымкент	208	213	240	197	176

Таким образом, вторая таблица показывает, что некоторые регионы Казахстана, такие как Актау и Туркестан, обладают стабильным и высоким потенциалом для использования солнечных батарей, в то время как другие, например, Караганда и Петропавловск, могут требовать специальных решений из-за снижения количества солнечных дней в последние годы.

Далее представлен анализ данных о солнечной радиации, температуре и оптимальных углах наклона солнечных панелей за 2023 год в регионе с координатами 49.8185° N и 73.1046° E. Данные включают показатели глобальной и рассеянной радиации, месячные средние температуры, а также оптимальные углы наклона, которые помогают максимизировать захват солнечной энергии в зависимости от времени года.

Оптимальный угол наклона солнечной панели определяется с учетом нескольких факторов. Чем выше широта, тем больше углы наклона изменяются в зависимости от времени года. Широта (49.8185° N) будет влиять на то, как сильно нужно наклонять панель для максимального получения солнечной энергии. Солнечное излучение варьируется в течение года. Например, зимой солнце находится ниже на небе, поэтому панели нужно наклонять под большим углом, в то время как летом угол наклона может быть меньшим. Данные о глобальном горизонтальном и прямом нормальном солнечном облучении показывают, сколько солнечной энергии доступно в каждом месяце. Оптимальный угол наклона панели может быть рассчитан для максимизации захвата этого излучения [6]

Оптимальные углы наклона: Декабрь - Февраль 64.82°, Март – Май 49.82°, Июнь - Август 34.82°, Сентябрь - Ноябрь 49.82°.

Глобальное горизонтальное излучение (Таблица 4) представляет общее количество солнечной радиации, падающей на горизонтальную поверхность [5].

Прямое нормальное излучение (Таблица 5) отражает количество солнечной радиации, попадающей на поверхность, перпендикулярную солнечным лучам.

Глобальное излучение при оптимальном угле наклона (Таблица 6) демонстрирует, как изменения угла наклона могут повысить количество получаемой солнечной радиации.

Отношение рассеянной солнечной радиации к глобальной солнечной радиации (Таблица 7) на месячной основе дает представление о процентном соотношении рассеянного света.[7]

Для наглядного представления изменений в солнечной радиации в течение года, соотношения рассеянной солнечной радиации к глобальной солнечной радиации на месячной основе были построены диаграммы (рисунки 1-2).

Таблица 4 – Горизонтальное излучение

Месяц	Количество солнечной радиации, Вт·ч/м <sup>2</sup>
Январь	43.28
Февраль	62.15
Март	115.03
Апрель	171.81
Май	208.44
Июнь	203.36
Июль	209.00
Август	158.26
Сентябрь	85.86

Октябрь	62.80
Ноябрь	32.51
Декабрь	29.15

Данные показывают, что наибольшее количество солнечной радиации падает на горизонтальную поверхность в мае и июле, достигая 208.44 Вт·ч/м<sup>2</sup> и 209.00 Вт·ч/м<sup>2</sup> соответственно. Напротив, минимальные значения наблюдаются в декабре (29.15 Вт·ч/м<sup>2</sup>) и ноябре (32.51 Вт·ч/м<sup>2</sup>), что указывает на низкую доступность солнечной радиации в зимние месяцы, что связано с облачностью и короткими днями

Таблица 1 - Количество солнечных дней в разных городах Казахстана 2023

Количество солнечных дней в разных городах Казахстана 2023													
	Январь	Февраль	Март	Апрель	Май	Июнь	Июль	Август	Сентябрь	Октябрь	Ноябрь	Декабрь	Общее
Караганда	8	6	11	15	11	8	11	4	2	8	8	11	103
Астана	15	15	15	19	12	8	4	2	2	10	9	12	123
Алматы	20	14	13	13	11	8	11	8	7	13	17	11	146
Актобе	20	12	12	18	12	13	5	7	5	4	8	11	127
Атырау	20	5	16	15	13	16	9	19	16	10	6	9	154
Усть-Каменогорск	8	10	12	14	14	14	11	9	2	8	12	9	123
Тараз	13	11	11	12	14	16	20	17	14	15	11	14	168
Уральск	21	10	20	23	21	20	17	18	18	15	8	6	197
Костанай	13	6	15	15	6	5	5	1	3	2	5	8	84
Кызылорда	18	8	13	15	17	19	16	11	10	15	8	11	161
Актау	18	8	18	21	15	23	20	23	23	25	12	13	219
Павлодар	8	15	17	24	23	15	9	8	5	18	10	12	164
Петропавловск	9	10	16	16	16	7	9	2	2	5	5	9	106
Туркестан	20	9	19	15	18	24	21	15	18	17	18	10	204
Шымкент	13	6	12	22	12	20	19	16	11	15	16	14	176

Таблица 5 – Прямое нормальное излучение

Месяц	Количество солнечной радиации, Вт·ч/м <sup>2</sup>
Январь	80.12
Февраль	64.40
Март	138.01
Апрель	232.39
Май	238.42
Июнь	219.53
Июль	237.57
Август	178.38
Сентябрь	81.88
Октябрь	69.68
Ноябрь	48.78
Декабрь	61.13

Наиболее значительные значения прямого нормального излучения фиксируются в мае (238.42 Вт·ч/м<sup>2</sup>) и июле (237.57 Вт·ч/м<sup>2</sup>), что подчеркивает высокий уровень солнечной активности в эти месяцы. Прямое нормальное излучение важно для солнечных панелей, устанавливаемых под углом, так как оно отражает количество солнечного света, попадающего непосредственно на панели [8]. Низкие значения, как и в предыдущей категории, наблюдаются в зимние месяцы, с минимальным значением в феврале (64.40 Вт·ч/м<sup>2</sup>).

Таблица 6 - Глобальное излучение при оптимальном угле наклона

Месяц	Количество солнечной радиации, Вт·ч/м <sup>2</sup>
Январь	89.52
Февраль	93.43
Март	156.58
Апрель	208.94
Май	216.90
Июнь	196.44
Июль	209.20
Август	175.57
Сентябрь	105.95
Октябрь	92.43
Ноябрь	59.77
Декабрь	65.80

Максимальное излучение при оптимальном угле наклона наблюдается в мае (216.90 Вт·ч/м<sup>2</sup>) и июле (209.20 Вт·ч/м<sup>2</sup>), минимальное — в ноябре

(59.77 Вт·ч/м<sup>2</sup>) и декабре (65.80 Вт·ч/м<sup>2</sup>), что подтверждает сезонные колебания солнечной энергии.



Рисунок 1 – Ежемесячные оценки солнечного облучения

Таблица 7 – Отношение рассеянной солнечной радиации к глобальной солнечной радиации

Месяц	Количество солнечной радиации, Вт·ч/м <sup>2</sup>
Январь	0.52
Февраль	0.63
Март	0.44
Апрель	0.24
Май	0.28
Июнь	0.31
Июль	0.28
Август	0.34
Сентябрь	0.52
Октябрь	0.53
Ноябрь	0.58
Декабрь	0.54



Рисунок 2 – Рассеянная солнечная радиация

Зимой (январь — 0.52, февраль — 0.63) преобладает рассеянная радиация из-за облачности, тогда как весной (март — 0.44, апрель — 0.24) больше прямой радиации благодаря ясной погоде.

### Выводы

В ходе исследования установлено, что уровень солнечного излучения и количество солнечных дней в Казахстане значительно различаются по регионам. Актау и Туркестан имеют стабильное количество солнечных дней, что делает их перспективными для солнечных систем, тогда как Караганда и Петропавловск требуют адаптивных технологий из-за снижения солнечных дней. Оптимальные углы наклона панелей варьируются от 64.82° зимой до 34.82° летом, что необходимо учитывать для максимальной производительности. Учет этих факторов и внедрение адаптивных технологий могут повысить эффективность солнечных систем и способствовать устойчивому развитию энергетики в Казахстане.

### СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1 **Мусса, С. М.** Потенциал солнечной энергии в Казахстане: обзор [Текст] // Международный журнал по возобновляемым источникам энергии. – 2020. – 15 с.

2 **Грин, М. А., Тредголд, А. Дж.** Таблицы эффективности солнечных ячеек [Текст] // Solar Energy. – 2010. – С. 245-253.

3 Gismeteo [Электронный ресурс]. – <https://www.gismeteo.kz> (Дата обращения: 23.09.2024).

4 **Takeev, X. B.** Оценка солнечной энергии в Казахстане [Текст] // Вестник КазНТУ. – 2021. – Т. 6. – С. 42-48.

5 **Али, У., Омер, А.** Тенденции солнечной радиации и их влияние на производительность фотоэлектрических систем в Казахстане [Текст] // Energy Reports. – 2021. – Т. 7. – С. 1089-1095.

6 **Халид, А., Ахтар, Р.** Влияние изменения климата на производство солнечной энергии в Центральной Азии [Текст] // Journal of Environmental Science and Technology. – 2022. – Т. 19. – С. 144-152.

7 **Кумар, С., Сайни, Р. П.** Обзор систем солнечных фотоэлектрических модулей: производительность и проектирование [Текст] // Renewable and Sustainable Energy Reviews. – 2019. – Т. 100. – С. 353-365.

8 **Чжан, Х., Лю, Ц.** Обширный обзор технологий солнечной энергии в Казахстане [Текст] // Energy. – 2020. – Т. 207. – С. 118-129.

9 **Бахар, Ф. А., Ыылдырым, М.** Оценка потенциала солнечной энергии для фотоэлектрических приложений в Казахстане [Текст] // International Journal of Renewable Energy Research. – 2020. – Т. 10. – С. 801-810.

10 **Кабир, Е., Кумар, С.** Обзор возобновляемых источников энергии и их применения в контексте устойчивого развития [Текст] // Renewable Energy Focus. – 2021. – Т. 34. – С. 22-30.

## REFERENCES

1 **Mussa, S. M.** Potential solnechnoy energii v Kazakhstan: obzor [Potential of Solar Energy in Kazakhstan: A Review] [Text]. – Mezhdunarodnyy zhurnal po vobnovlyаемым istochnikam energii. – 2020. – 15 p.

2 **Green, M. A., Tredgold, A. D.** Tablitsy effektivnosti solnechnykh yacheek [Efficiency Tables of Solar Cells] [Text]. – Solar Energy. – 2010. – P. 245-253.

3 Gismeteo [Electronic resource]. - <https://www.gismeteo.kz> (Accessed: 23.09.2024).

4 **Takeev, K. B.** Otsenka solnechnoy energii v Kazakhstan [Assessment of Solar Energy in Kazakhstan] [Text]. – Vestnik KazNTU. – 2021. – Vol. 6. – P. 42-48.

5 **Ali, U., Omer, A.** Tendentsii solnechnoy radiatsii i ikh vliyanie na proizvoditelnost fotoelektricheskikh sistem v Kazakhstan [Solar Radiation Trends and Their Impact on Photovoltaic System Performance in Kazakhstan] [Text]. – Energy Reports. – 2021. – Vol. 7. – P. 1089-1095.

6 **Khalid, A., Akhtar, R.** Vliyanie izmeneniya klimata na proizvodstvo solnechnoy energii v Tsentralnoy Azii [Impact of Climate Change on Solar

Energy Production in Central Asia] [Text]. – Journal of Environmental Science and Technology. – 2022. – Vol. 19. – P. 144-152.

7 **Kumar, S., Saini, R. P.** Obzor sistem solnechnykh fotoelektricheskikh moduley: proizvoditelnost i proektirovanie [Review of Solar Photovoltaic Systems: Performance and Design] [Text]. – Renewable and Sustainable Energy Reviews. – 2019. – Vol. 100. – P. 353-365.

8 **Zhang, X., Liu, C.** Obshirnyy obzor tekhnologiy solnechnoy energii v Kazakhstan [Comprehensive Review of Solar Energy Technologies in Kazakhstan] [Text]. – Energy. – 2020. – Vol. 207. – P. 118-129.

9 **Bahar, F. A., Yildirim, M.** Otsenka potentsiala solnechnoy energii dlya fotoelektricheskikh prilozheniy v Kazakhstan [Assessment of Solar Energy Potential for Photovoltaic Applications in Kazakhstan] [Text]. – International Journal of Renewable Energy Research. – 2020. – Vol. 10. – P. 801-810.

10 **Kabir, E., Kumar, S.** Obzor vobnovlyаемых istochnikov energii i ikh primeneniya v kontekste ustoychivogo razvitiya [A Review of Renewable Energy Sources and Their Applications in the Context of Sustainable Development] [Text]. – Renewable Energy Focus. – 2021. – Vol. 34. – P. 22-30.

Поступило в редакцию 23.10.24

Поступило с исправлениями 13.01.25

Принято в печать 10.03.25

\**А. Т. Ергалиева<sup>1</sup>, Л. А. Авдеев<sup>2</sup>, Ш. З. Телбаева<sup>3</sup>, С. В. Войткевич<sup>4</sup>, В. А. Иванов<sup>5</sup>*

<sup>1,2,3,4,5</sup>Әбілқас Сағынов атындағы Қарағанды техникалық университеті,

Қарағанды қ. Қазақстан Республикасы

23.10.24 ж. баспаға түсті.

13.01.25 ж. түзетулерімен түсті.

10.03.25 ж. басып шығаруға қабылданды.

## ҚАЗАҚСТАННЫҢ ӘР ТҮРЛІ АЙМАҚТАРЫНДАҒЫ КҮН ПАНЕЛЛЕРІНІҢ ТИІМДІЛІГІНЕ КҮН ЕКЕНДЕРІНІҢ ӘСЕРІ

*Бұл мақалада Қазақстанның әртүрлі аймақтарындағы күн белсенділігі мен радиациясын талдаумен байланысты процестер және олардың күн панельдерінің тиімділігіне әсері қарастырылады. Зерттеудің мақсаты – күн энергиясын пайдалануды оңтайландыру үшін маңызды тенденциялар мен жағдайларды анықтау үшін еліміздің әртүрлі қалаларындағы күн радиациясының деңгейін және шуақты күндер санын бағалау. Бұл мақалада 2019 жылдан 2023 жылға дейінгі*

күн белсенділігі туралы деректерді жинау және күн белсенділігінің өзгеруін және оның күн жүйелерінің жұмысына әсерін бағалау үшін осы деректерді талдауды қоса алғанда, зерттеу қадамдары егжей-тегжейлі сипатталған. Жүргізілген бақылаулар күн радиациясының қарқындылығының табиғи ауытқуларын және олардың әртүрлі аймақтардың климаттық ерекшеліктерімен байланысын жақсы түсінуге көмектеседі, бұл күн қондырғыларын жоспарлау кезінде пайдалы болуы мүмкін. Қорытындылар күн жүйелерін орнату және аймақтық климаттық жағдайларға негізделген технологияларды бейімдеу үшін орындарды таңдаудың маңыздылығын көрсетеді. Қазақстанның кейбір аймақтарында күн радиациясының тұрақты деңгейінің арқасында күн панельдері тиімдірек жұмыс істей алатыны анықталды, бұл әсіресе жаңа күн фермаларын жобалау үшін құнды. Бұл зерттеулер Қазақстанда күн технологияларын енгізу және оңтайландыру стратегиясын қалыптастыруға ықпал ете алады, бұл өз кезегінде тұрақты энергия көздерін дамытуға ықпал етеді. Осылайша, жұмыс нәтижелері жергілікті энергетиканы жоспарлауға ғана емес, сонымен қатар Қазақстанда жаңартылатын энергия көздерін пайдалануды кеңейтуге, экологиялық жағдайды жақсартуға және елдің энергетикалық тәуелсіздігін сақтауға көмектесуі мүмкін.

*Кілтті сөздер:* Күн панельдері, тиімділік, жаңартылатын энергия, эксперименттік деректер, ауа райы жағдайлары, күн энергиясы..

\*A. T. Yergaliyeva<sup>1</sup>, L. A. Avdeev<sup>2</sup>, Sh. Z. Telbaeva<sup>3</sup>, S. V. Voitkevich<sup>4</sup>, V. A. Ivanov<sup>5</sup>  
<sup>1,2,3,4,5</sup>Abylkas Saginov Karaganda Technical University,

Republic of Kazakhstan, Karaganda

Received 23.10.2024

Received in revised form 13.01.25

Accepted for publication 10.03.25

## **INFLUENCE OF SOLAR ACTIVITY ON THE EFFICIENCY OF SOLAR PANELS IN DIFFERENT REGIONS OF KAZAKHSTAN**

*This paper discusses the processes involved in analyzing solar activity and radiation in different regions of Kazakhstan and their impact on the efficiency of solar panels. The objective of the study is to assess the level of solar radiation and the number of sunny days in different cities of the*

*country to identify trends and conditions important for optimizing the use of solar energy. The paper describes in detail the stages of the study, including collecting solar activity data from 2019 to 2023 and analyzing this data to assess changes in solar activity and its impact on the performance of solar systems. The observations conducted help to better understand natural variations in solar radiation intensity and their relationship with climatic features of different regions, which can be useful when planning solar installations. The results obtained emphasize the importance of choosing a location for installing solar systems and adapting technologies depending on regional climatic conditions. It was found that in some areas of Kazakhstan, solar panels can operate with greater efficiency due to more stable levels of solar radiation, which is especially valuable for designing new solar farms. These studies can contribute to the formation of strategies for the implementation and optimization of solar technologies in Kazakhstan, which, in turn, will contribute to the development of sustainable energy sources. Thus, the results of the work can be useful not only for local energy planning, but also for expanding the use of renewable energy sources in Kazakhstan, contributing to improving the environmental situation and maintaining the country's energy independence.*

*Keywords:* Solar panels, efficiency, renewable energy, experimental data, weather conditions, solar energy.

<https://doi.org/>

**Л. Н. Есмаханова<sup>1</sup>, Ж. Е. Шукманов<sup>2</sup>, Ә. Б. Сағындық<sup>3</sup>,  
Б. Б. Исабекова<sup>4</sup>, \*Ж. Б. Исабеков<sup>5</sup>**

<sup>1,2</sup>М. Х. Дулати атындағы Тараз өңірлік университеті,  
Қазақстан Республикасы, Тараз қ.

<sup>3,4,5</sup>Торайғыров университеті, Қазақстан Республикасы, Павлодар қ.

<sup>1</sup>ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-3308-9676>

<sup>2</sup>ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-3017-7133>

<sup>3</sup>ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-0376-2150>

<sup>4</sup>ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-5044-3211>

<sup>5</sup>ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-3980-1617>

\*e-mail: [Zh\\_is@mail.ru](mailto:Zh_is@mail.ru)

## **PLC НЕГІЗІНДЕГІ ҚЫСҚА ТҰЙЫҚТАЛҒАН РОТОРЫ БАР АСИНХРОНДЫ ҚОЗҒАЛТҚЫШТЫ БАСҚАРУ ЖҮЙЕЛЕРІ**

*Мақалада электр кешендерін басқару жүйелерінің негізгі түрлерін, олардың сипаттамаларын және қолдану салаларын зерттеуге мүмкіндік беретін стенд талқыланады. Зертханалық стенд релейлік тізбектер тілінде контроллерлерді бағдарламалауды тиімді оқытуға арналған. Стендте зертханалық жұмысты орындағаннан кейін студенттер бағдарламалық-логикалық контроллер негізінде басқару жүйелерін, соның ішінде бағдарламалық жасақтаманы құруды өз бетінше жасай алады. Зертханалық стендте FX3U48MR бағдарлама логикалық контроллері қолданылады. Зертханалық жұмыста бағдарлама логикалық контроллерін бағдарламалау үшін Mitsubishi Electric компаниясы өз өнімдерімен бірге жеткізілетін GX Developer пакеті қолданылады. Студентке қойылған міндет – зертханалық стендте құрылған бағдарламалық құралдың жұмысын тексере отырып, бақылау бағдарламасын және оның алгоритмінің диаграммасын жасау. Мақаланың ғылыми жаңалығы - стендте электр кешендерін басқарудың типтік жүйелерінің қасиеттері, өндірістік желілерді басқару жүйелерінің типтік функциялары, автоматтандырылған электр жетегі жүйесін жобалау негіздері оқытылады. Ғылыми мақаланың мақсаты - контроллерлерді*

*Ladder Diagram (LD) тілінде бағдарламалауы және JET-075GT жиілік түрлендіргіші бар PLC негізіндегі тиім торлы роторы бар асинхронды қозғалтқышты басқару жүйесін жасау болып табылады. Ұсынылып отырған стенд - заманауи қуатты жартылай өткізгіш түрлендіргіштерді пайдалана отырып реттелетін асинхронды электр жетектерін зерттеу және практикалық қолдану электромеханикалық кешендердің жоғары тиімділігі мен сенімділігін қамтамасыз ету мүмкіндігін көрсетеді.*

*Кілтті сөздер: басқару жүйелері, зертханалық стенд, бағдарлама логикалық контроллері, датчик, басқару түймелері.*

### **Кіріспе**

Қазақстандағы өндіріс тиімділігінің артуы өнеркәсіпте электр энергиясының негізгі тұтынушысы – электромеханикалық жүйелердің (электр жетектерінің) дамуымен және жетілдірілуімен байланысты. Қазіргі уақытта бұл елде өндірілетін барлық электр энергиясының шамамен 60% құрайды.

Өнеркәсіптік кәсіпорындарды электрмен жабдықтау жүйесіндегі электр энергиясының жалпы ысыраптарының негізгі бөлігін электр жетектері құрайды, сондықтан электр жетектерін тиімді пайдаланудың халық шаруашылығында маңызы зор. Қазіргі уақытта электр жетегі тұтынылатын барлық электр энергиясының шамамен 80% ең қарапайым массалық реттелмейтін электр жетегінен және 20% басқарудан келеді [1;2].

Стенд электр кешендерін басқару жүйелерінің негізгі түрлерін, олардың сипаттамаларын және қолдану аймақтарын зерттеуге мүмкіндік береді. Сондай-ақ электр кешендерін басқарудың типтік жүйелерінің қасиеттерін, олардың құрылымдарын, жұмыс істеу принциптерін; электр жетектерін логикалық басқару; басқару жүйелерін құрудың математикалық сипаттамасы және принциптері; электр жетек координаттарын басқару принциптерін; технологиялық желіні басқару жүйелерінің типтік функциялары; электр жетегінің басқару элементтерін бағдарламалық қамтамасыз ету; автоматтандырылған электр жетек жүйесін жобалау негіздерін игеруге үйретеді.

«Электромеханикалық кешендерді оңтайлы басқару» зертханалық стенді студенттерге FX3U 48MR заманауи өнеркәсіптік контроллері негізіндегі тітіркендіргіш роторы бар асинхронды қозғалтқышты оның жұмысын Ladder Diagram (LD) тілінде бағдарламалаумен басқару жүйесін әзірлеуді үйретуге арналған және JET-075GT жиілік түрлендіргіші. Стенд айнымалы ток электр жетегінің басқару жүйелерін құрастыру және баптау дағдыларын, электр кешендерін басқару жүйелерін оңтайландыру дағдыларын, нақты басқару

жүйелерімен жұмыс істеу дағдылары мен дағдыларын меңгеруге, сондай-ақ өз бетінше жалпылау және қорытындылар жасауға мүмкіндік береді.

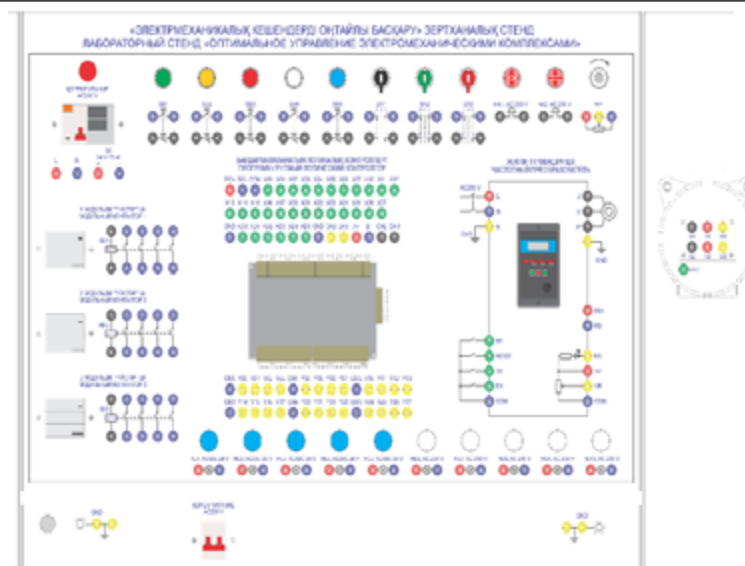
### Материалдар мен әдістері

Зерттеу шарттары мен әдістері. Зертханалық жұмыста ПЛК бағдарламалау үшін GX Developer пакеті қолданылады, оны Mitsubishi Electric өз өнімдерімен бірге жеткізеді. 1-суретте «Электромеханикалық кешендерді оңтайлы басқару» стендінің жалпы көрінісі көрсетілген.

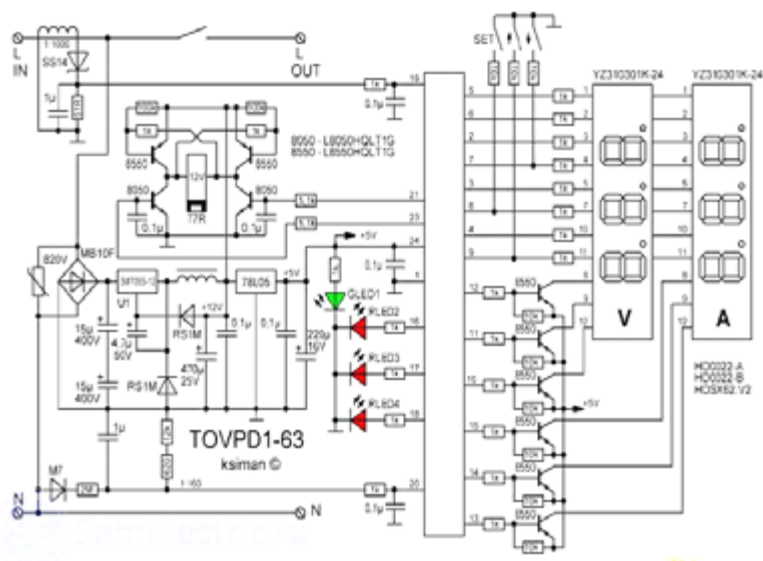
Жаттығу стендінің алдыңғы панелі мен корпусы келесі элементтерден тұрады:

- екі полюсті ажыратқышты, қалдық тоқты ажыратқышты және төмен кернеуден, асқын кернеуден және асқын токтан қорғау релесін қамтитын айнымалы ток көзі;
- тұрақты ток көзі 24DC/72W;
- қалыпты ашық және жабық контактілері бар түймелер;
- үш позициялы басқару кілті;
- 230В айнымалы токта жарық және дыбыс сигнализациясы;
- 24В айнымалы ток және 230 В айнымалы ток үшін сигналдық шамдар;
- 10 кОм потенциометрді орнату;
- 3 модульдік контакторлар 63 А, төрт қуатты қалыпты ашық контактілер (СТ1-63, 4P, 63 А, 230 В, ~ 50/60 Гц, Din-rail, 4NO);
- бағдарламаланатын логикалық контроллер FX3U 48MR Mitsubishi;
- жиілік түрлендіргіші JET-075GT, қуаты 0,75 кВт бір фазалы кірісі 230 ВАС және үш фазалы шығысы 0 - 230 В, жиілігі 1,0 - 99,0 Гц;
- контактілі розеткалар.

2-суретте TOMZN TOVPD1-40-EC ток бақылауымен кернеу релесі схемасы келтірілген.



Сурет 1 – «Электромеханикалық кешендерді оңтайлы басқару» стендінің жалпы көрінісі

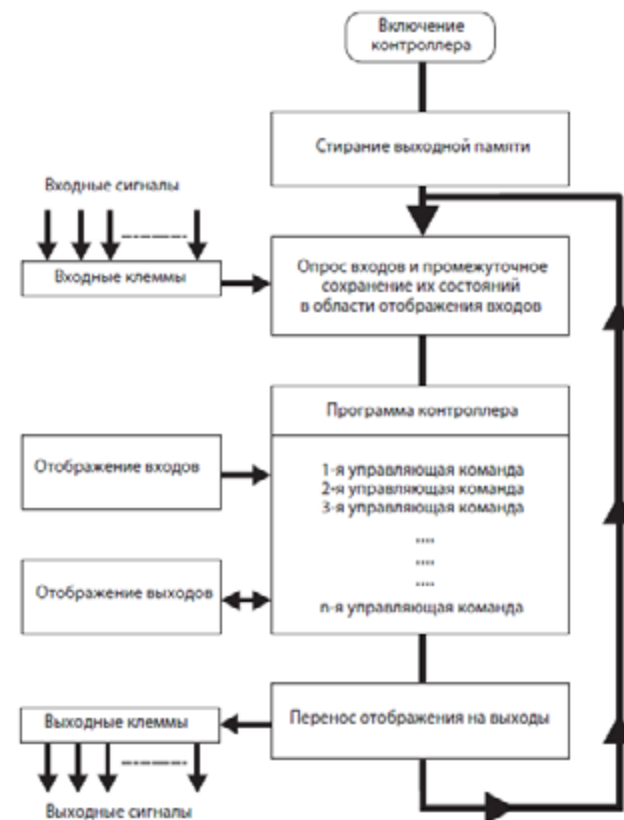


Сурет 2 – TOMZN TOVPD1-40-EC ток бақылауымен кернеу релесі схемасы

Бағдарламаланатын контроллер берілген бағдарлама бойынша жұмыс істейді, ол әдетте контроллерден тыс құрылады, содан кейін контроллерге беріледі және оның жадында сақталады [3, 27-б.]. Бағдарламалау үшін контроллердің бағдарламаны қалай өңдейтінін білу маңызды [4;5].

Бағдарлама контроллердің жұмысын анықтайтын жеке командалар сериясынан тұрады. Контроллер басқару командаларын бірінен соң бірі бағдарламаланған ретпен өңдейді [6, 41-б.].

3-суретте бағдарланатын логикалық контроллерде (ПЛК) бағдарламаның орындалуының құрылымдық схемасы көрсетілген.

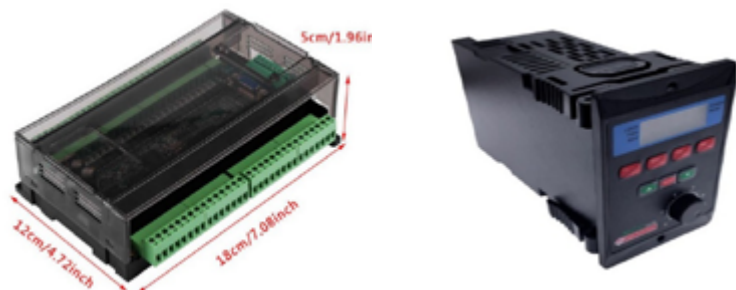


Сурет 3 – Бағдарланатын логикалық контроллерде (ПЛК) бағдарламаның орындалуының құрылымдық схемасы

Mitsubishi FX3U-48MR бағдарламаланатын контроллері 48 кіріс/шығыстан тұратын Melsec FX сериялы модулі болып табылады. Жалпы, FX3U PLC сериясы 16-128 кіріс/шығыс нүктесі бар контроллерлерді пайдалануға мүмкіндік береді. Шығу сигналының әртүрлі типтері (реле немесе транзистор) және әртүрлі кернеулер (100...240 VAC немесе 24 VDC) үшін опциялар бар [7, 201-б.].

4-суретте бағдарланатын логикалық контроллердің FX3U-48MR сыртқы көрінісі келтірілген.





Сурет 4 – Бағдарланатын логикалық контроллер FX3U-48MR

Сурет 5 – «Электромеханикалық кешендерді оңтайлы басқару» зертханалық стендінің JET-075GT жиілік түрлендіргішінің жалпы көрінісі

«Электромеханикалық кешендерді оңтайлы басқару» зертханалық стендінде JET-075GT бір фазалы жиілік түрлендіргіші орнатылған. Жиілік түрлендіргіштің кірісіне бір фазалы 230 В қуат беріледі, ал жиілік түрлендіргішінің шығысында 3x230 В үш фазалы қуат алынады, ол шнурлы торлы роторы бар асинхронды қозғалтқыш үшін қорек көзі ретінде пайдаланылады. Бұл жағдайда, мысалы, үшбұрышты/жұлдызды қосылымға  $\Delta/Y$  230/400 В мүмкіндік беретін қозғалтқышты үшбұрышты конфигурацияда қосуға болады.

JET-075GT жиілік түрлендіргіші - қуаты 750 Вт аспайтын асинхронды үш фазалы электр қозғалтқышының жұмыс параметрлерін реттеуге және визуалды бақылауға арналған функционалды толық электрондық құрылғы [8, 103-6.].

Жиілік түрлендіргіші панель түріндегі бекіткіші бар пластикалық корпуста орнатылған электронды компоненттері бар тақта түрінде жасалған.

Жылдамдықты басқару тұрақты V/F қатынасын сақтауға негізделген скалярлық басқару әдісін пайдаланып қоректену кернеуінің жиілігін өзгерту арқылы жүзеге асады.

5-суретте «Электромеханикалық кешендерді оңтайлы басқару» зертханалық стендінің JET-075GT жиілік түрлендіргішінің жалпы көрінісі келтірілген.

Корпустың алдыңғы жағында басқару элементтері бар:

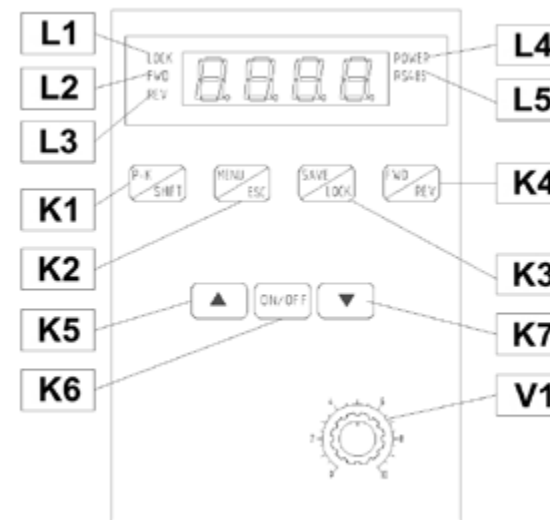
- ағымдағы күйді көрсетуге арналған элементтер (қозғалтқыштың айналу және тоқтау бағытының жарық диодты индикаторлары (FWD, REV, STOP), сондай-ақ жылдамдықты көрсетуге және жұмыс параметрлерін орнатуға арналған цифрлық дисплей;

- P-K/SHIFT, MENU/ESC, SAVE/LOCK, FWD/REV, ▲ және ▼ түймелері (параметрлерді таңдау түймелері), ON/OFF (START/STOP);

- жылдамдықты реттеуге арналған потенциометр;

Корпустың артқы жағында электр қозғалтқышын, қоректендіру кернеуін, кіріс және шығыс сигналдарын қосу үшін екі терминалдык блок бар.

6-суретте барлық маңызды элементтері бар жиілік түрлендіргішінің басқару панелінің сыртқы түрі келтірілген.



Сурет 6 – Барлық маңызды элементтері бар жиілік түрлендіргішінің басқару панелінің сыртқы түрі:

L1 – индикатор LOCK; L2 – индикатор FWD (ВПЕРЕД); L3 – индикатор REV (НАЗАД); L4 – индикатор POWER (ПИТАНИЕ); L5 – индикатор RS485; K1 – P-K/SHIFT батырмасы (ВЫБОР/СДВИГ); K2 – MENU/ESC батырмасы (МЕНЮ/ВЫХОД); K3 – SAVE/LOCK батырмасы (ВВОД/БЛОК); K4 – FWD/REV батырмасы (ВПЕРЕД/НАЗАД); K5, K7 – ▲ және ▼ батырмалары (параметрлерді таңдау үшін); K6 – ON/OFF батырмасы (ПУСК/СТОП); V1 – кіріктірілген потенциометр.

L1-L4 индикаторларының және K1-K7 батырмаларының жұмысы:

- L1 LOCK индикаторы K1, K2 және K4 түймелері құлыпталған кезде жыпылықтайды;

- L2 Электр қозғалтқышы алға бағытта қозғалған кезде FWD индикаторы үздіксіз жанады. Алға бағытта қозғалғаннан кейін тоқтаған кезде FWD индикаторы жыпылықтайды;

- L3 Электр қозғалтқышы қарама-қарсы бағытта қозғалған кезде REV индикаторы үздіксіз жанады. REV индикаторы кері қозғалыстан кейін тоқтаған кезде жыпылықтайды;

- L4 POWER индикаторы жиілік түрлендіргішінің қуат терминалдарына қоректену кернеуі берілгенде үздіксіз жанады;

- L5 Байланыс RS485 интерфейсі арқылы жүзеге асырылған кезде RS485 индикаторы жыпылықтайды;

- K1 P-K/SHIFT (ВЫБОР/СДВИГ) түймесі дисплейде көрсетілген қозғалтқыштың ағымдағы жұмыс параметрін (жұмыс жиілігі, жылдамдық және т.б.) таңдау үшін қолданылады;

- K2 MENU/ESC түймесі операция параметрлерін орнату мәзіріне кіру және шығу үшін пайдаланылады;

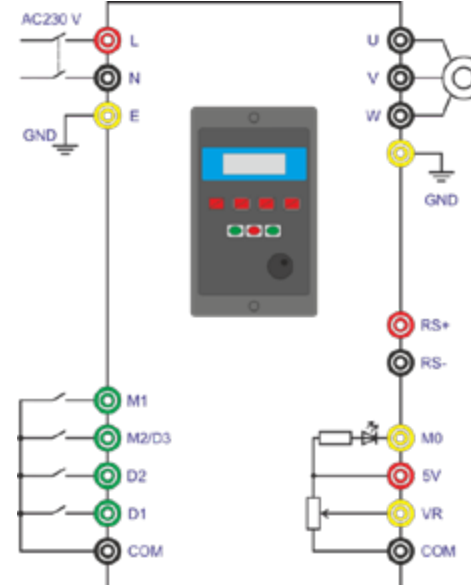
- K3 SAVE/LOCK (ВВОД/БЛОК) түймесі жұмыс параметрлерін орнату кезінде параметр мәнін сақтау және басқару панелінің K1, K2 және K4 түймелерін құлыптау/құлып ашу үшін пайдаланылады. Құлыптау/құлып ашу K3 түймесін 3 секунд ұстап тұру арқылы жүзеге асырылады. K1, K2 және K4 түймелері электр қозғалтқышы жұмысын тоқтатқаннан кейін үш минуттан кейін автоматты түрде құлыпталады, бұл ретте RS485 интерфейсі арқылы деректер алмасу жоқ;

- K4 FWD/REV (ВПЕРЕД/НАЗАД) түймесі қозғалтқыштың айналу бағытын ауыстыру үшін пайдаланылады;

- K5, K7 ▲ және ▼ түймелері жылдамдық мәнін өзгерту үшін, сондай-ақ параметр опциясын таңдау үшін пайдаланылады;

- K6 ON/OFF (ҚОСУ/ӨШПРУ) түймесі қозғалтқышты іске қосу және тоқтату үшін қолданылады.

7-суретте JET-075GT жиілік түрлендіргішіне қосылу схемасы көрсетілген.

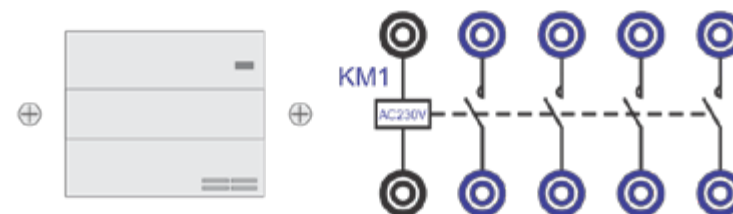


Сурет 7 – JET-075GT жиілік түрлендіргішіне қосылу схемасы

Жиілік түрлендіргіші 230 В бір фазалы кернеуден жұмыс істеуге арналған.

Жиілік түрлендіргіші үш фазалы электр қозғалтқышымен жұмыс істеуге арналған, орамдар тек «Үшбұрышпен» қосылады - 230 В.

Оқу стендінде СТ1-63, 4P, 63 А, 230 В, ~ 50/60 Гц, Din-рейка, 4NO 3 модульдік контакторлары бар. Контакттор контактордың А1 және А2 терминалдарына 230 Вольт кернеуді қолдану арқылы басқарылады.



Сурет 8 – Зертханалық стендтің модульдік контакторы

Модульдік контактор қалыпты режимде токтарды ауыстыруға арналған. Яғни, бұл электр құрылғысы тізбекті төтенше жағдайлардан - шамадан

тыс жүктемеден және қысқа тұйықталудан қорғамайды [9;10;11;12]. Сондықтан, қорғағыштары бар тізбектерді жасаған кезде, тізбекті авариялық жұмыс жағдайларынан қорғайтын автоматты ажыратқыштар немесе сақтандырғыштарды қамтамасыз ету қажет. Электр қозғалтқыштарын іске қосу үшін контакторлар пайдаланылса, олардың тізбегіне қозғалтқышты шамадан тыс жүктемеден қорғайтын жылу релесі қосылуы керек.

Нәтижелер және талқылау

Зерттеу нәтижелерін талқылау. Инфрақызыл және индуктивті датчиктер, ПЛК және АД көмегімен жылжымалы есікті автоматты басқару схемасының релелік диаграммасы 9-суретте көрсетілген.

Берілген схемада:

X000 – инфрақызыл датчиктен контроллер кірісі;

X001 – индуктивті датчиктен контроллер кірісі;

M0 – ішкі реле;

Y000 – бірінші модульдік контактордың катушкасына контроллердің шығысы KM1 (ұяшық A2);

Y001 – контроллердің екінші модульдік контактордың катушкасына шығуы KM2 (ұяшық A2);

Y002 – есіктің ашылуы немесе жабылуы туралы сигнал беретін HL6 дабылына контроллердің шығысы;

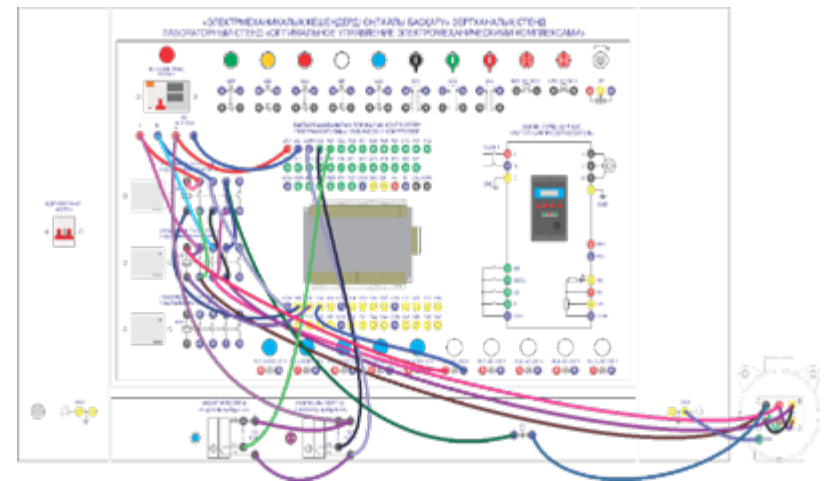
T0 – есікті ашу таймері (уақытты 30 секунд етіп орнатуға болады).

T1 – есікті жабу таймері (уақытты 10 секундқа орнатуға болады).



Сурет 9 – Жылжымалы есікті автоматты басқару бағдарламасының релелік диаграммасы

Содан кейін стендте келесі диаграмманы жинау керек:



Сурет 10 – ПЛК және модульдік контакторлары бар жылжымалы автоматты есікті басқару схемасы

Әзірленген «Электромеханикалық кешендерді оңтайлы басқару» стенді «Электр механикалық кешендерді оңтайлы басқару», «Автоматтандырылған электр жетектерін жобалаудың типтік технологиялық процестері» пәндері бойынша зертханалық сабақтарды, сонымен қатар өнеркәсіптік логикалық контроллермен айнаымалы жиілікті жетектің жұмысын зерттеуге арналған.

«Электромеханикалық кешендерді оңтайлы басқару» зертханалық стенді студенттерге JET-075GT, Ladder Diagram (LD) тілінде контроллерлерді

бағдарламалауы бар ПЛК негізіндегі торлы роторы бар асинхронды қозғалтқышты басқару жүйесін әзірлеуді үйретуге арналған. жиілікті түрлендіргіш, оның жұмысын бағдарламалаумен.

Зертханалық стенд релелік тізбектер тілінде контроллерлерді бағдарламалауды тиімді оқытуға арналған. Стендте зертханалық жұмысты орындағаннан кейін студенттер PLC негізіндегі басқару жүйелерін, соның ішінде бағдарламалық қамтамасыз етуді жасауды өз бетінше жасай алады. Зертханалық стенд FX3U48MR бағдарланатын логикалық контроллерін пайдаланады. Зертханалық жұмыста ПЛК бағдарламалау үшін GX Developer пакеті қолданылады, оны Mitsubishi Electric өз өнімдерімен бірге жеткізеді. Студенттің міндеті – бақылау бағдарламасын және оның алгоритмінің сызбасын құрастыру және жасалған бағдарламалық құралдың жұмысын зертханалық стендте тексеру.

Осылайша, зертханалық жұмыстар ПЛК бағдарламалау және олардың негізінде басқару жүйелерін құру саласындағы теориялық ақпаратты тәжірибеде бекітуге мүмкіндік береді.

Бұл зертханалық кешенді пайдалану оны болашақта емтихан стенді симуляторы ретінде пайдалануға мүмкіндік береді, сонымен қатар зертханалық жабдықтың дәстүрлі мүмкіндіктерін айтарлықтай кеңейтеді.

#### Қорытынды

Зертханалық стенд заманауи электржетектерді басқару жүйелерін зерттеуге және сынауға мүмкіндік береді. Оның көмегімен асинхронды қозғалтқыштың бағдарламаланатын логикалық контроллер арқылы қалай жұмыс істейтінін түсініп, мұндай жүйелердің негізгі қасиеттерін зерттеуге және талдауға болады. Бұл электротехникалық кешендердің жұмыс тиімділігі мен сенімділігін арттыру үшін өте маңызды, әсіресе өнеркәсіптік автоматтандыруда.

Стенд әртүрлі басқару алгоритмдерін әзірлеуге және тексеруге мүмкіндік береді. Бұл технологиялық процестерді басқарудың оңтайлы шешімдерін табуға және оларды шынайы жағдайларға барынша жақын ортада сынауға мүмкіндік береді. Мұндай эксперименттер электржетектердің жұмысын жақсартуға және олардың энергия тұтынуын азайтуға көмектеседі, бұл ғылым мен өнеркәсіп үшін пайдалы.

Сонымен қатар, стенд студенттерді оқыту және мамандар даярлау үшін маңызды құрал болып табылады. Онда ПЛК бағдарламалауда тәжірибе жинақтап, автоматтандырылған жүйелерді жобалау негіздерін үйренуге және өз шешімдерін әзірлеуге болады. Бұл заманауи басқару технологияларын теориялық және практикалық тұрғыдан игеруге ықпал етеді.

Осылайша, зертханалық стендті пайдалану автоматтандыру саласындағы өзекті мәселелерді шешуге, электржетектерді басқарудың жана тәсілдерін

дамытуға және заманауи электротехникалық жүйелермен жұмыс істеуге қажетті білікті кадрларды дайындауға көмектеседі.

#### ПАЙДАЛАНЫЛҒАН ДЕРЕКТЕР ТІЗІМІ

1 **Анучин, А. С.** Системы управления электроприводов: учебник для вузов [Текст]. – М.: Издательский дом МЭИ, 2015. – С. 373.

2 **Воскобойник, В. Э.** Основы электропривода производственных машин и комплексов: учебное пособие [Текст]. – Д.: Государственный ВУЗ «НГУ», 2015. – С. 121.

3 **Красовский, А. Б.** Основы электропривода: учебное пособие [Текст]. – Москва: Издательство МГТУ им. Н. Э. Баумана, 2015. – С. 405.

4 **Arshed A. Saher, Jawad R. Mahmood.** PLC based Multi Three-Phase Induction Motors Motion Controller. // International Journal of Computer Applications. – 2017. – Vol. 175(1). – P.37-44.

5 **Ayman Seksak Elsaid, Wael A. Mohamed, Salah Ghazy Ramadan.** Speed Control of Induction Motor Using PLC and SCADA System // Ayman Seksak Elsaid et al. Int. Journal of Engineering Research and Applications. – 2016. – Vol. 6(1). – P. 98-104.

6 **Кацман, М. М.** Электр жетек: Оқулық. – М.: «Академия» баспа орталығы, 2014. – Б. 387.

7 **Фролов, Ю. М., Шелякин, В. П.** Проектирование электропривода промышленных механизмов: Учебное пособие [Текст] – СПб.: Издательство «Лань», 2014. – С. 448.

8 **Кангин, В. В.** Аппаратные и программные средства систем управления. Промышленные сети и контроллеры [Текст]. – М.: Бином. Лаборатория знаний, 2010. – С. 424.

9 **Медведев, М. Ю.** Программирование промышленных контроллеров [Текст]. – М.: Лань, 2011. – С. 288.

10 **Петров, И. В.** Программируемые контроллеры. Стандартные языки и приемы прикладного проектирования [Текст]. – М.: «СОЛОН-Пресс», 2010. – С. 256.

11 **Максимычев, О.И.** Программирование логических контроллеров (PLC): учеб. пособие [Текст]. – М.: МАДИ, 2016. – С. 188.

12 **Парр, Э.** Программируемые контроллеры. Руководство для инженера [Текст]. – М.: БИНОМ Библиотека знаний, 2009. – С. 516.

## REFERENCES

- 1 **Anuchin, A. S.** Sistemy` upravleniya e`lektroprivodov: uchebnik dlya vuzov [Electric drive control systems: a textbook for universities] [Text]. – M.: MPEI Publishing House, 2015. – P. 373.
- 2 **Voskoboynik, V. E.** Osnovy` e`lektroprivoda proizvodstvenny`x mashin i kompleksov: uchebnoe posobie [Fundamentals of electric drive of production machines and complexes: textbook] [Text]. – D.: State University «NSU», 2015. – P. 121.
- 3 **Krasovsky, A. B.** Osnovy` e`lektroprivoda: uchebnoe posobie [Basics of electric drive: textbook] [Text]. – Moscow: Publishing house of MSTU im. N. E. Bauman, 2015. – P. 405.
- 4 **Arshed A. Saher, Jawad R. Mahmood.** PLC based Multi Three-Phase Induction Motors Motion Controller. // International Journal of Computer Applications. – 2017. – Vol. 175(1). – P. 37-44.
- 5 **Ayman Seksak Elsaid, Wael A. Mohamed, Salah Ghazy Ramadan.** Speed Control of Induction Motor Using PLC and SCADA System // Ayman Seksak Elsaid et al. Int. Journal of Engineering Research and Applications. – 2016. – Vol. 6(1). – P. 98-104.
- 6 **Katsman, M. M.** E`lektz zhetek: Okuly`k [Electric drive: tutorial]. – M.: «Academy» Baspa Ortalygy, 2014. – B. 387.
- 7 **Frolov, Yu. M., Shelyakin, V. P.** Proektirovanie e`lektroprivoda promy`shlenny`x mexanizmov: Uchebnoe posobie [Design of electric drives of industrial mechanisms: Textbook] [Text] – St. Petersburg: Lan Publishing House, 2014. – P. 448.
- 8 **Kangin, V.V.** Apparaty`e i programmy`e sredstva sistem upravleniya. Promy`shlenny`e seti i kontrolyery` [Hardware and software of control systems. Industrial networks and controllers] [Text]. – M.: Binom. Knowledge Laboratory, 2010. – P. 424.
- 9 **Medvedev, M. Yu.** Programmirovaniye promy`shlenny`x kontrollerov [Programming of industrial controllers] [Text]. – M.: Lan, 2011. – P. 288.
- 10 **Petrov, I. V.** Programmiruemy`e kontrolyery`. Standartny`e yazy`ki i priemy` prikladnogo proektirovaniya [Programmable controllers. Standard languages and techniques for applied design] [Text]. – M.: SOLON-Press», 2010. – P. 256.
- 11 **Maksimychyev, O.I.** Programmirovaniye logicheskix kontrollerov (PLC): ucheb. posobie [Programming logic controllers (PLC): textbook.] [Text]. – M.: MADI, 2016. – P. 188.

12 **Parr, E.** Programmiruemy`e kontrolyery`. Rukovodstvo dlya inzhenera [Programmable controllers. Engineer's Guide] [Text]. – M.: BINOM Library of Knowledge, 2009. – P. 516.

20.09.24 ж. баспаға түсті.  
10.01.25 ж. түзетулерімен түсті.  
10.03.25 ж. басып шығаруға қабылданды.

*Л. Н. Есмаханова<sup>1</sup>, Ж. Е. Шукманов<sup>2</sup>, Ә. Б. Сағындық<sup>3</sup>,  
Б. Б. Исабекова<sup>4</sup>, \*Ж. Б. Исабеков<sup>5</sup>*

<sup>1,2</sup>Таразский региональный университет имени М. Х. Дулати,  
Республика Казахстан, г. Тараз  
<sup>3,4,5</sup>Торайғыров университет, Республика Казахстан, г. Павлодар  
Поступило в редакцию 20.09.24  
Поступило с исправлениями 10.01.25  
Принято в печать 10.03.25

## СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ АСИНХРОННЫМ ДВИГАТЕЛЕМ С КОРОТКОЗАМКНУТЫМ РОТОРОМ НА БАЗЕ ПЛК

*В статье рассматривается стенд, который позволяет изучать основные типы систем управления электротехническими комплексами, их характеристики и области применения. Лабораторный стенд разработан для эффективного обучения программированию контроллеров на языке релейно-контактных схем. После выполнения лабораторных работ на стенде, студенты смогут самостоятельно разработать системы управления на базе программно-логического контроллера, включая создание программного обеспечения. На лабораторном стенде задействован программно-логический контроллер FX3U48MR. В лабораторных работах для программирования ПЛК используется пакет GX Developer, который поставляется фирмой Mitsubishi Electric совместно со своей продукцией. Обязательной задачей студента является разработка управляющей программы и схемы ее алгоритма, проверка работы созданного программного обеспечения на лабораторном стенде. На стенде изучаются свойства типовых систем управления электротехническими комплексами, типовые функции систем управления технологическими линиями, основы проектирования системы автоматизированного электропривода. Цель научной работы - разработать систему управления асинхронным*

*двигателем с короткозамкнутым ротором на базе ПЛК с программированием контроллеров на языке релейно-контактных схем Ladder Diagram (LD), частотного преобразователя JET-075GT, с программированием его работы. Применение данного лабораторного стенда позволит использовать его в перспективе как экзаменационный стенд-тренажер, а также значительно расширить традиционные возможности лабораторного оборудования. Исследование и практическое использование регулируемых асинхронных электроприводов с использованием современных силовых полупроводниковых преобразователей показывают возможность обеспечения высокой эффективности и надежности электромеханических комплексов.*

*Ключевые слова: системы управления, лабораторный стенд, программно-логический контроллер, датчик, кнопки управления.*

L. Yesmakhanova<sup>1</sup>, Zh. Shukamanov<sup>2</sup>, A. B. Sagyndyk<sup>3</sup>,

B. B. Issabekova<sup>4</sup>, \*J. B. Issabekov<sup>5</sup>

<sup>1,2</sup>M.Kh. Dulaty Taraz Regional University, Republic of Kazakhstan, Taraz

<sup>3,4,5</sup>Toraigyrov University, Republic of Kazakhstan, Pavlodar

Received 20.09.24

Received in revised form 10.01.25

Accepted for publication 10.03.25

## **PLC-BASED ASYNCHRONOUS MOTOR CONTROL SYSTEMS WITH A CLOSED-LOOP ROTOR**

*The article discusses a stand that allows you to study the main types of control systems for electrical complexes, their characteristics and areas of application. The laboratory stand is designed for effective training in programming controllers in the language of relay circuits. After completing laboratory work at the stand, students will be able to independently develop control systems based on a program-logical controller, including the creation of software. The laboratory bench uses a program logic controller FX3U48MR. In laboratory work, for programming the program logic controller, the GX Developer package is used, which is supplied by Mitsubishi Electric together with its products. The obligatory task of the student is to develop a control program and a diagram of its algorithm, testing the operation of the created software on a laboratory bench. At the stand, the properties of standard control systems for electrical complexes,*

*standard functions of control systems for production lines, and the basics of designing an automated electric drive system are studied. The purpose of the scientific work is to develop a control system for an asynchronous motor with a squirrel-cage rotor based on a PLC with programming of controllers in the Ladder Diagram (LD) language, a JET-075GT frequency converter, with programming of its operation. The use of this laboratory stand will allow it to be used in the future as an examination bench simulator, as well as significantly expand the traditional capabilities of laboratory equipment. Research and practical use of adjustable asynchronous electric drives using modern power semiconductor converters show the possibility of ensuring high efficiency and reliability of electromechanical complexes.*

*Key words: control systems, laboratory stand, program logic controller, sensor, control buttons.*

<https://doi.org/>

**\*У. Жалмагамбетова<sup>1</sup>, А. Нефтисов<sup>2</sup>, А. Шимпф<sup>3</sup>,  
А. Кислов<sup>4</sup>, М. Крыкбаева<sup>5</sup>**

1,3,4,5Торайғыров университет, Республика Казахстан, г. Павлодар

2Astana IT University, Республика Казахстан, г. Астана

<sup>1</sup>ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-2261-2222>

<sup>2</sup>ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-4079-2025>

<sup>3</sup>ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-4203-9117>

<sup>4</sup>ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-4816-8008>

<sup>5</sup>ORCID: <https://orcid.org/0009-0001-0770-5164>

\*e-mail: [ultuara@mail.ru](mailto:ultuara@mail.ru)

## **ПРОЕКТИРОВАНИЕ СИСТЕМ ПЕРЕДАЧИ ИНФОРМАЦИИ ДЛЯ АВТОМАТИЗИРОВАННОГО ЭКОЛОГИЧЕСКОГО МОНИТОРИНГА**

*В данной статье представлены различные способы передачи информации, используемые в современных беспроводных технологиях. Обзор необходим для выбора наиболее оптимальной конфигурации беспроводной автономной системы экологического мониторинга, использующего радиоканалы в труднодоступных местах без покрытия GSM. Просторы нашей страны, от знойных пустынь до суровых гор, требуют умных и автономных решений для контроля за состоянием окружающей среды и инфраструктуры. LoRa - это крайне эффективный способ передачи данных, которые можно использовать в труднодоступных местах. Датчики-помощники в национальных парках обеспечат такую связь, которая позволит им фиксировать малейшие изменения в климате и состоянии экосистемы, а значит, поможет сохранить парки для будущих поколений. Приведен вариант сопряжения устройств SX1278 LoRa и Arduino Uno, с примером фрагментов кодировки и соединения компонентов устройств для использования передачи данных экологического мониторинга. Разработанное устройство представлено в сборе без корпуса, как комплект состоящий из одного автономного передатчика и приемника подключенного к компьютеру оператора (АРМ) соответственно. На данном примере можно использовать и другие типы модулей при этом*

*необходимо обратиться к документации используемого оборудования для получения необходимой информации о сопряжении устройств.*

*Ключевые слова: экологический мониторинг, передача данных, беспроводные технологии, телеметрические сети, радиоканал*

### **Введение**

В настоящее время основная часть обрабатываемой информации передается через интернет и мобильные сети. Но есть места, где связь по традиционным каналам не доступна или бывает весьма нестабильной. Для преодоления этих трудностей разработаны различные технологии передачи данных.

Как подчеркивает Теодор Рапппорт в книге «Беспроводные коммуникации: «Одной из ключевых проблем беспроводных систем является ограниченность покрытия в горных районах, густых лесах и удалённых территориях, что в свою очередь, требует специальных решений для надежной связи» [1].

Проблема существует не только в отдаленных районах, но и в ситуациях, когда наши обычные средства связи выходят из строя как, например, во время чрезвычайных ситуациях. Во время стихийных бедствий или из-за непогоды могут выходить из строя сервера, частично средства связи, сотовые антенны и другие узлы, при этом спутниковая связь также может отсутствовать.

Для многих отраслей промышленности и сельского хозяйства в условиях отсутствия традиционной инфраструктуры связи обеспечение передачи данных является жизненной необходимостью. А как мы знаем, беспроводные технологии в этом смысле сильно продвинулись вперед. Современные беспроводные технологии, включая LoRaWAN, и даже частные спутниковые каналы связи могут использоваться для передачи телеметрической информации с большого числа устройств.

Одной из ключевых областей применения беспроводной передачи данных является мониторинг окружающей среды в труднодоступных местах. В Арктике и Антарктиде повсеместно используются автономные метеостанции, такие как система AWS (Automatic Weather Stations). Данные от таких станций о состоянии погоды передаются через спутниковые и LoRa-сети. К примеру, для вулканологических исследований на Этне, была создана сеть беспроводных датчиков, которые собирали данные о сейсмической активности, температуре и газовом составе атмосферы. Аналогичные решения, были использованы для обустройства сети датчиков в гляциологических исследованиях планетарных ледников. Искусственно созданные датчики, собрав достаточное количество научных данных, передавали информацию для анализа из арктических условий через

дроны-ретрансляторы в спутниковую сеть [2]. Аналогично обеспечивают беспроводную передачу данных в горах и на море, в условиях массовых бедствий. Отметим, что поисково-спасательные операции на суше и на море также требуют наличия связи. В горных странах, таких как Австрия работает система AlpSAR, с использованием в качестве основного оборудования устройства по технологии LoRaWAN применяемых на высоких перевалах. Между этими пунктами и альпинистами, находящимися в опасности, передача информации производится через немногочисленные и мощные радиостанции, которые работают на очень низких частотах [3].

В условиях массовых бедствий обычно применяют временные Mesh-сети. В 2017 году после урагана Мария в Пуэрто-Рико на силиконовых аэростатах (проект Loon), которые не могли подняться высоко в небо, были развернуты радиомаяки. Эти маяки со связью Mesh обеспечили автономную связь между людьми и спасателями [4]. Для морских спасательных операций применяются автономные аварийные радиомаяки (EPIRB).

В области промышленного контроля и сельском хозяйстве беспроводные системы передачи данных позволяют автоматизировать процессы контроля и управления ресурсами. В Австралии система, работающая на основе LoRaWAN предназначенная для мониторинга состояния почвы, обеспечивает оптимизацию ирригации. Один из таких проектов был запущен в 2019 году компанией National Narrowband Network Company (NNNCo) совместно с Goanna Ag [5].

Энергоэффективная система под названием WISDOM (Wireless Irrigation System for Development in the Outback in Marsupial) управляет ресурсами с низким потреблением электроэнергии, автоматизируя ирригацию, что дает значительный экономический эффект. Решения, подобные описанным выше, адаптированы и используются в транспортной сфере и инфраструктурных проектах.

В системах высокоскоростного транспорта, таких как Hyperloop, беспроводные датчики передают данные о давлении и температуре в герметичных туннелях. В Японии развернута сеть LoRaWAN, позволяющая мониторить вибрации и состояние мостов. Эти данные помогают, во-первых, предсказывать будущие проблемы с конструкциями и во-вторых, обеспечивать безопасность людей, когда мосты начинают сильно вибрировать, как например, перед землетрясением [6].

Современные беспроводные технологии позволяют с высокой эффективностью решать задачи, связанные с мониторингом и передачей данных в случаях, когда полностью отсутствуют традиционные сетевые коммуникации. LoRaWAN, спутниковые системы и Mesh-сети являются хорошей альтернативой и обеспечивают надежность связи в самых

разных промышленных средах, на природных объектах и в ходе аварийно-спасательных операций.

### **Материалы и методы**

Современные беспроводные технологии открывают новые возможности для передачи данных в условиях полного отсутствия традиционной связи. Наиболее перспективными из современных решений являются сотовые сети, системы, работающие с использованием технологий спектрального расширения, и энергоэффективные способы связи на больших расстояниях.

Ключевым подходом является Mesh-сеть – децентрализованная архитектура, в которой каждый узел способен передавать данные не только для себя, но и ретранслировать их для других устройств. Эта структура позволяет обеспечить высокую отказоустойчивость: если один из узлов выходит из строя, данные автоматически перенаправляются через альтернативные маршруты. Это делает Mesh-технологии незаменимыми в системах мониторинга, спасательных операциях и автономных устройствах в сложных условиях.

Сеть Mesh формируется по принципу динамической маршрутизации: каждый узел сети анализирует доступные для передачи пути и выбирает самый оптимальный маршрут, что позволяет поддерживать связь даже при изменении топологии сети [7].

Но в малонаселенных районах эффективность этих сетей оказывается недостаточной. Причина кроется в том, что сеть из узлов (простых, или более сложных, типа антенн) становится ненадежной, если её плотность ниже определенного минимума.

Использование технологии Chirp Spread Spectrum (CSS), представляющей собой способ частотного рассеяния, в котором используется линейно изменяемая частота, позволяет значительно увеличить дальность и помехозащищенность связи. CSS, в отличие от традиционных способов, где используются фиксированные частоты для передачи данных, встраивает в приемлемый по мощности сигнал большую информацию за счет изменения частоты во времени. На этом принципе и строится архитектура LoRa, одной из самых надежных для использования в различных средах.

Технологии LPWAN - Low Power Wide Area Network, к которым относится LoRa, рассчитаны на то, чтобы передавать недалеко и слабо, на это уходит очень мало энергии, и поэтому эти технологии отлично подходят для работы с автономными сенсорными системами, которые располагаться в местах, где не всегда есть возможность подвести укрытие. LoRa - это универсальная технология, которая может работать как в режиме LoRa P2P (точка-точка), обеспечивая связь между двумя устройствами, так и в формате LoRaWAN, когда данные передаются через шлюзы на централизованные



сервера. LoRa использует частотную модуляцию, для передачи данных. Элементы передачи данных не меняются в своих параметрах; они меняются по частоте в пределах довольно широкого диапазона для интеграции в различные топологии и методы передачи данных [8]. К преимуществам LoRa можно отнести работу с низкоскоростными, но высокочастотными сетями, при этом передача не требует большой мощности и обеспечивает прекрасную работу даже в довольно «шумном» радиочастотном пространстве и при наличии, казалось бы, «слабых» сигналов транслирует их на большие расстояния.

Можно сказать, что LoRa — одно из наиболее сбалансированных решений для передачи данных в условиях отсутствия покрытия сети. У неё хорошее сочетание низкого энергопотребления, дальности, устойчивости к помехам и возможности развёртывания как простых P2P-сетей, так и многоузловых систем. Эти свойства делают LoRa практически незаменимой в системах, требующих надежной связи.

#### Результаты и обсуждение

Для организации беспроводной передачи данных в условиях полного отсутствия традиционного сетевого покрытия используются энергоэффективные средства [9]. Для автономных систем мониторинга оптимальной является комбинация микроконтроллера, радиомодуля LoRa, согласованной антенны, позволяющая обеспечивать стабильную работу даже в сложных условиях.



Рисунок 1 – Arduino Uno

В качестве управляющего устройства используется микроконтроллерная плата Arduino Uno, представленная на рисунке 1, построенная на базе ATmega328P. Этот 8-разрядный микроконтроллер с тактовой частотой 16 МГц, 32 КБ флэш-памяти и 2 КБ ОЗУ обладает достаточной вычислительной мощностью для обработки данных с периферийных устройств и организации их передачи по радиоканалу. Arduino Uno имеет огромный набор библиотек, что значительно упрощает разработку программного обеспечения, а его низкое энергопотребление позволяет применять платформу в автономных системах с ограниченными ресурсами питания [10].

Передача данных реализуемая с использованием радиомодуля LoRa SX1278, изображен на рисунке 2, работает в диапазоне 433 МГц. Этот модуль использует метод спектрального расширения (CSS), с высокой помехоустойчивостью и возможностью связи на значительных расстояниях, вплоть до 10 километров в условиях открытой местности. Чувствительность приёмника достигает -148 дБм, что позволяет уверенно принимать слабые сигналы, а гибкость настройки скорости передачи данных позволяет балансировать между дальностью связи и пропускной способностью канала. В автономных системах используется режим LoRa P2P (Point-to-Point), позволяющий обходиться без сетевой инфраструктуры и централизованных шлюзов.



Рисунок 2 – Радиомодуль LoRa

Для обеспечения надёжной связи применяется антенна с резонансной частотой 433 МГц и коэффициентом усиления до 5 dBi. Оптимальное согласование антенны с выходным сопротивлением модуля (50 Ом) минимизирует потери мощности и повышает эффективность радиоканала, что особенно критично в системах с низким энергопотреблением.

Программное обеспечение системы реализовано на базе библиотек, обеспечивающих удобное взаимодействие с аппаратными модулями. Для

работы с LoRa SX1278 используется библиотека RadioHead, предоставляющая гибкие механизмы настройки параметров связи.

Оптимизация энергопотребления достигается за счёт перевода микроконтроллера в режим пониженного энергопотребления между сеансами связи, что значительно увеличивает время автономной работы системы.

Таблица 1 – Фрагмента кода для LoRa-радиосвязи на языке Arduino.

Код для приема	Код для отправки
<code>#include &lt;SPI.h&gt;</code>	<code>#include &lt;SPI.h&gt;</code>
<code>#include &lt;LoRa.h&gt;</code>	<code>#include &lt;LoRa.h&gt;</code>
<code>void setup()</code>	<code>void setup()</code>
<code>{ LoRa.begin(433E6);</code>	<code>{LoRa.begin(433E6);}</code>
<code>Serial.begin(9600);}</code>	<code>void loop() {</code>
<code>void loop() {int packetSize = LoRa.parsePacket();</code>	<code>LoRa.beginPacket();</code>
<code>if (packetSize) { String message = LoRa.readString();</code>	<code>LoRa.print("Проверка связи»);</code>
<code>Serial.println(message);}</code>	<code>LoRa.endPacket();</code>
	<code>delay(1000);}</code>

Схема подключения всех элементов представлен на рисунке 3.

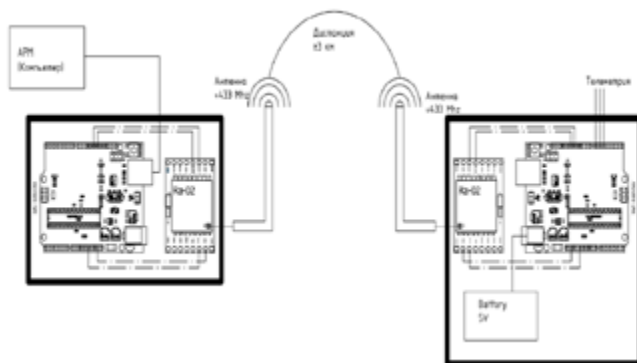


Рисунок 3 – Принципиальная схема системы передачи данных

Таблица 1 – Подключения компонентов модуля SX1278 LoRa к Arduino Uno

RA-02	Arduino
3.3V	3.3V
GND	GND
MISO	12
MOSI	11
SCK	13
NSS	10
RST	9
DIO0	2

Демонстрация работы кода в IDE Arduino представлена на рисунке 4.

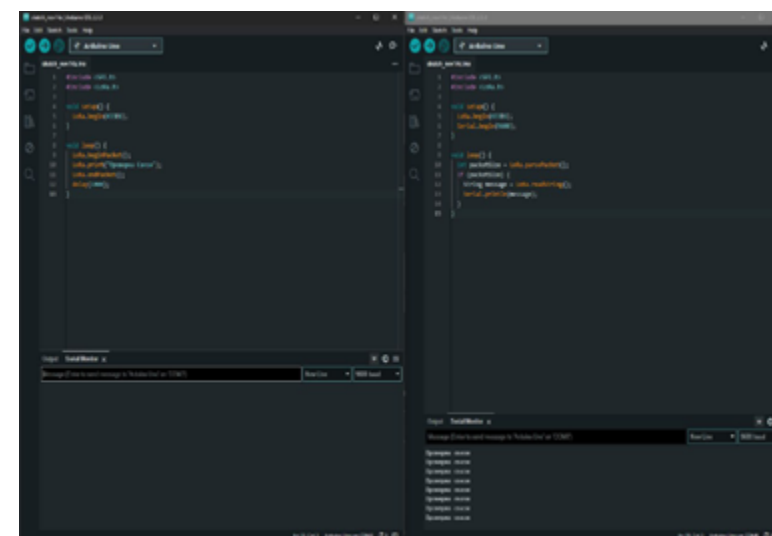


Рисунок 4 – IDE Arduino

На рисунке 5 представлены в сборе без корпуса комплект состоящий из одного автономного передатчика и приемника подключенного к компьютеру оператора (APM) соответственно.



Рисунок 5 – Комплект для передачи данных

### Информация о финансировании

Исследования выполнены при поддержке Комитета науки Министерства науки и высшего образования Республики Казахстан в рамках программы ИРН BR21882258 «Разработка комплекса интеллектуальных информационно-коммуникационных систем для экологического мониторинга эмиссий в окружающую среду для принятия решения в концепте углеродной нейтральности».

### Выводы

В статье представлены конкретные шаги, которые могут различаться в зависимости от модели модуля, в нашем случае SX1278 LoRa и Arduino Uno, используемые для передачи данных экологического мониторинга.

Преимущества представленной конфигурации устройства для приема-передачи информации — это низкое энергопотребление, дальность связи и высокая помехоустойчивость, что позволяет создавать надежные телеметрические сети, даже в самых труднодоступных уголках. Развертывание сети, с использованием указанного оборудования при низких затратах, довольно несложное мероприятие, но самый главный плюс - для работы не нужны сотовые операторы. Все это делает описанную конфигурацию идеальным кандидатом для решения проблемы отсутствия связи в труднодоступных местах.

При использовании других модулей рекомендуется обратиться к документации используемого оборудования для получения необходимой информации о сопряжении устройств.

## СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1 **Rappaport, T. S.** Wireless Communications. - Prentice Hall; First Edition, Rappaport, Theodore S., 1996, 641c

2 <https://www.thethingsnetwork.org/article/the-first-lorawan-gateway-running-in-antarctica>

3 **Marshall, H.** «AlpSAR 2012-13, a Field Experiment on Snow Observations and Parameter Retrievals with Ku- and X-Band Radar». ESA Living Planet Symposium 2013.

4 William, D. P. LoRa Technology in Flying Ad Hoc Networks: A Survey of Challenges and Open Issues Sensors 2023, 23, 2403. <https://doi.org/10.3390/s23052403>

5 <https://www.goannaag.com.au/media-releases-investors/new-iot-network-brings-next-generation-irrigation-solutions>

6 <https://habr.com/ru/companies/onlinepatent/articles/785710/>

7 **Perry, L.** Internet of Things for Architects: Architecting IoT solutions by implementing sensors, communication infrastructure, edge computing, analytics, and security. – Packt Publishing, Perry Lea, 2018, 524c.

8 **Сабко, А., Грудковский, Н.** Технология LORA, 53-я научная конференция аспирантов, магистрантов и студентов БГУИР, 2017 г.

9 **Кириченко, Л., Жалмагамбетова, У.** Методы определения эмиссий от основных стационарных источников загрязнений // Научный журнал «Вестник Торайғыров университета», энергетическая серия. – 2024 - № 3. – С. 152-163 <https://doi.org/10.48081/HRWJ4394>

10 **Zhalmagambetova, U., Radelyuk, I.** Development of an automatic monitoring system based on the open architecture concept // Научный журнал «Вестник Торайғыров университета», энергетическая серия. – 2024 - № 2 – С. 78-89 <https://doi.org/10.48081/BMOM3785>

## REFERENCES

1 **Rappaport, T. S.** Wireless Communications. - Prentice Hall; First Edition, Rappaport, Theodore S., 1996, 641c

2 <https://www.thethingsnetwork.org/article/the-first-lorawan-gateway-running-in-antarctica>

3 **Marshall, H.** «AlpSAR 2012-13, a Field Experiment on Snow Observations and Parameter Retrievals with Ku- and X-Band Radar». ESA Living Planet Symposium 2013.

4 **William, D. P.** LoRa Technology in Flying Ad Hoc Networks: A Survey of Challenges and Open Issues Sensors 2023, 23, 2403. <https://doi.org/10.3390/s23052403>

5 <https://www.goannaag.com.au/media-releases-investors/new-iot-network-brings-next-generation-irrigation-solutions>

6 <https://habr.com/ru/companies/onlinepatent/articles/785710/>

7 **Perry, L.** Internet of Things for Architects: Architecting IoT solutions by implementing sensors, communication infrastructure, edge computing, analytics, and security. - Packt Publishing, Perry Lea, 2018, 524с.

8 **Sabko, A.** Hrudkovskij, N. Technology LORA [Technology LORA ] 53rd Scientific Conference of Graduate, Master's Degree and Undergraduate Students of BSUIR, 2017.

9 **Kirichenko, L., Zhalmagambetova, U.** Metody opredeleniya emissij ot osnovnyh stacionarnyh istochnikov zagryaznenij [Methods for determining emissions from major stationary pollution sources]// Nauchnyj zhurnal «Vestnik Torajgyrov universiteta», energeticheskaya seriya. – 2024 - № 3. – С. 152–163 <https://doi.org/10.48081/HRWJ4394>

10 **Zhalmagambetova, U., Radelyuk, I.** Development of an automatic monitoring system based on the open architecture concept // Nauchnyj zhurnal «Vestnik Torajgyrov universiteta», energeticheskaya seriya. – 2024 – № 2 – С. 78-89 <https://doi.org/10.48081/BMOM3785>

Поступило в редакцию 12.02.25

Поступило с исправлениями 13.02.25

Принято в печать 10.03.25

\*У. Жалмагамбетова<sup>1</sup>, А. Нефтисов<sup>2</sup>, А. Шимпф<sup>3</sup>, А. Кислов<sup>4</sup>, М. Крыкбаева<sup>5</sup>

<sup>1,3,4,5</sup>Торайғыров университет, Қазақстан Республикасы, Павлодар қ.

<sup>2</sup>Astana IT University, Қазақстан Республикасы, Астана қ.

12.02.25 ж. баспаға түсті.

13.02.25 ж. түзетулерімен түсті.

10.03.25 ж. басып шығаруға қабылданды.

## АВТОМАТТАНДЫРЫЛҒАН ЭКОЛОГИЯЛЫҚ МОНИТОРИНГ ҮШІН АҚПАРАТ БЕРУ ЖҮЙЕЛЕРІН ЖОБАЛАУ

Бұл мақалада заманауи сымсыз технологияларда қолданылатын ақпаратты берудің әртүрлі әдістері келтірілген. Шолу GSM қамтуы жоқ жету қиын жерлерде радиоарналарды пайдаланатын сымсыз,

дербес экологиялық бақылау жүйесінің ең оңтайлы конфигурациясын таңдау үшін қажет. Біздің елдің кеңдігі, шөлді шөлдерден қатал тауларға дейін, қоршаған орта мен инфрақұрылымның жай-күйін бақылау үшін ақылды және дербес шешімдерді қажет етеді. LoRa-жету қиын жерлерде қолдануға болатын деректерді берудің өте тиімді әдісі. Ұлттық саябақтардағы көмекші датчиктер климат пен экожүйе жағдайындағы шамалы өзгерістерді түсіруге мүмкіндік беретін байланысты қамтамасыз етеді, бұл саябақтарды болашақ ұрпақ үшін сақтауға көмектеседі. SX1278 lora және Arduino Uno құрылғыларын жұптастыру опциясы келтірілген, мысалы, қоршаған ортаны бақылау деректерін пайдалану үшін құрылғы компоненттерін кодтау және қосу фрагменттері Әзірленген құрылғы корпуссыз жинақта ұсынылған, сәйкесінше бір дербес таратқыш пен компьютерге қосылған оператордың (АЖО) қабылдағышынан тұратын жиынтық. Бұл мысалда модульдердің басқа түрлерін қолдануға болады және құрылғылардың жұптасуы туралы қажетті ақпаратты алу үшін қолданылатын жабдықтың құжаттамасына жүзін қажет.

Кілтті сөздер сөздер: экологиялық мониторинг, деректерді беру, сымсыз технологиялар, телеметриялық желілер, радиоарна.

\*U. Zhalmagambetova<sup>1</sup>, A. Neftisov<sup>2</sup>, A. Shimpf<sup>3</sup>, A. Kislov<sup>4</sup>, M. Krykbaeva<sup>5</sup>

<sup>1,3,4,5</sup>Toraighyrov University, Republic of Kazakhstan, Pavlodar

<sup>2</sup>Astana IT University, Republic of Kazakhstan, Astana

Received 12.02.25

Received in revised form 13.02.25

Accepted for publication 10.03.25

## DESIGNING INFORMATION TRANSMISSION SYSTEMS FOR AUTOMATED ENVIRONMENTAL MONITORING

This article presents various ways of transmitting information used in modern wireless technologies. The review is necessary to select the most optimal configuration of a wireless autonomous environmental monitoring system using radio channels in hard-to-reach places without GSM coverage. The vast expanses of our country, from sultry deserts to harsh mountains, require smart and autonomous solutions to monitor the state of the environment and infrastructure. LoRa is an extremely efficient

way to transfer data that can be used in hard-to-reach places. Assistant sensors in national parks will provide a link that will allow them to detect the slightest changes in climate and ecosystem conditions, which means it will help preserve parks for future generations. A variant of pairing the SX1278 LoRa and Arduino Uno devices is given, with an example of encoding fragments and connecting device components to use environmental monitoring data transmission. The developed device is presented assembled without a housing, as a set consisting of one autonomous transmitter and receiver connected to an operator's computer (APM), respectively. In this example, you can use other types of modules, but you need to refer to the documentation of the equipment used to obtain the necessary information about device pairing.

*Keywords:* environmental monitoring, data transmission, wireless technologies, telemetry networks, radiochannel.

МРНТИ 44.29.37

<https://doi.org/>

**\*А. К. Жумадилова**

Торайғыров университет, Республика Казахстан, г. Павлодар

ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-0232-6779>

\*e-mail: [zhumadirova.a@teachers.tou.edu.kz](mailto:zhumadirova.a@teachers.tou.edu.kz)

## **РЕАЛИЗАЦИЯ ЗАЩИТЫ ОТ ОДНОФАЗНОГО ЗАМЫКАНИЯ НА ЗЕМЛЮ С АВТОМАТИЧЕСКИМ ИЗМЕНЕНИЕМ УСТАВКИ ТОКА**

*В данной статье разработано программное обеспечение устройства централизованной защиты от однофазного замыкания на землю в электрических сетях промышленных предприятий.*

*Основой для разработки устройства служит метод централизованной защиты линий от однофазного замыкания на землю (ОЗЗ) с автоматическим изменением уставки защиты по току ОЗЗ при изменении конфигурации распределительной электрической сети с изолированной нейтралью напряжением 6–10 кВ. Применение данного способа обеспечивает высокую селективность защиты от однофазного замыкания на землю, что способствует повышению надежности и уровня электробезопасности при эксплуатации электроустановок.*

*При разработке алгоритма функционирования устройства применялась теория цветных сетей Петри. Теория цветных сетей Петри близка к структурным методам моделирования систем, она базируется на хорошо разработанном математическом аппарате и поэтому допускает проведение аналитических и имитационных исследований.*

*При выборе элементной базы устройства наиболее целесообразно применение микропроцессоров, так как они обладают большими вычислительными и логическими возможностями при высокой надежности, универсальности применения, малых размерах и дешевизне. В частности, микроконтроллеры семейства AVR отличаются большой скоростью работы, большой универсальностью, быстроедействием. В результате проведенного анализа был выбран*

*микроконтроллер фирмы Atmel Corporation Atmega8535 как наиболее оптимальный для реализации устройства.*

*Ключевые слова: электрическая сеть, однофазное замыкание, централизованная защита, микроконтроллер, программное обеспечение.*

### Введение

В настоящее время все более широкое применение находят релейные защиты на основе микропроцессорных средств и систем. Это обусловлено их надежностью, быстродействием и селективностью. В своей структуре цифровые защитные устройства имеют много общего и строятся в большинстве случаев на базе микроконтроллеров. Микроконтроллер, являясь центральным узлом защиты, через устройства ввода-вывода и периферийные узлы интегрируется с электрической сетью. Для правильного функционирования цифровых защит важно выбрать соответствующую элементную базу, иметь хорошо прописанные алгоритм и программный код, позволяющие учесть все нюансы процесса и избежать ошибок.

Как известно, в реальных устройствах защиты может использоваться несколько процессоров, то есть один процессор решает отдельную задачу общего комплекса защиты. Целью такого разделения является повышение быстродействия. В статье будет рассмотрена защита от однофазного замыкания на землю на базе однокристального микроконтроллера. Существует достаточно большое количество способов и устройств защиты от однофазных замыканий. Каждое из них имеет как достоинства, так и недостатки. Какое из них окажется наиболее совершенным покажет только опыт эксплуатации. Поэтому разработка новых защит является актуальной [1; 2].

### Материалы и методы

Для функционирования централизованной защиты от однофазного замыкания на землю с автоматическим изменением уставки тока в сетях 6–10 кВ промышленных предприятий на основе составленного алгоритма [3; 4; 5; 6] разработано программное обеспечение.

На первом этапе для проверки алгоритма использовался метод цветных сетей Петри. Главная сеть, приведенная на рисунке 1, имеет три подсети – работающие фидеры, вычисление тока уставки и сравнение токов в фидерах с током уставки. Из анализа [3] следует, что полученная сеть Петри является живой и обратимой, в ней отсутствуют тупиковые состояния, и имеется дуга, направленная к начальной метке. Следовательно сеть, моделирующая устройство защиты от однофазного замыкания на землю, является правильной сетью. Далее следует перейти к выбору элементной базы и написанию программного кода.

Доминирующее положение на рынке современных микроконтроллеров занимают четыре архитектуры: MCS-51, AVR, PIC и HC68. Анализируя новые модели AVR-микроконтроллеров, можно отметить, что их производительность увеличилась скачкообразно по сравнению с аналогичными PIC и MCS-51 контроллерами. Таким образом, в качестве элементной базы, на основе которого функционирует устройство выбран микроконтроллер фирмы Atmel Corporation Atmega8535.

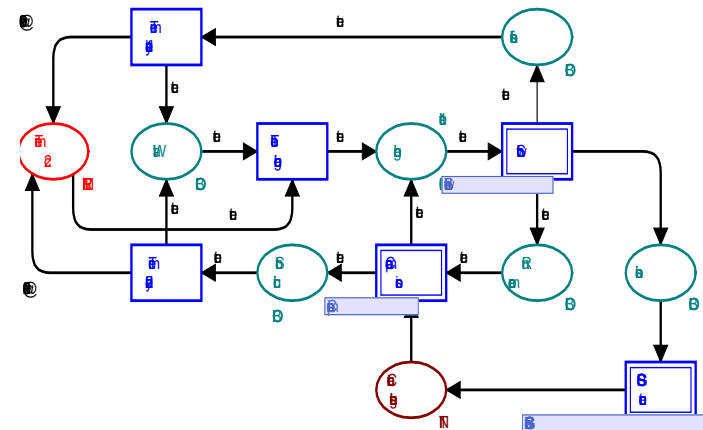


Рисунок 1 – Главная сеть Петри, моделирующая устройство защиты

Функциональная схема устройства с микроконтроллером приведена на рисунке 2. Ток уставки рассчитывается в зависимости от параметров работающих фидеров. Для этого, как показано на рисунке 2, считываются величины напряжений, через согласующие преобразователи поступающие в порт ввода А. На этот же порт подаются сигналы, уровень которых соответствует значениям протекающих в фидерах токов. В схеме в качестве согласующих преобразователей используются электромагнитные трансформаторы с ферромагнитным сердечником.

АЦП, расположенный в линиях порта А, преобразовывает сигналы токов и напряжений в цифровые коды. Процессор производит обработку сигналов в соответствии с алгоритмом.

При превышении тока, протекающего в фидере, значения уставки защиты по току однофазного замыкания на землю, центральным процессором формируется команда на отключение соответствующего выключателя. Порт С микроконтроллера частично сконфигурирован на вывод – включение

и отключение фидеров. Связь защиты и высоковольтного выключателя осуществляется с помощью твердотельного реле, представляющее собой полупроводниковый ключ.

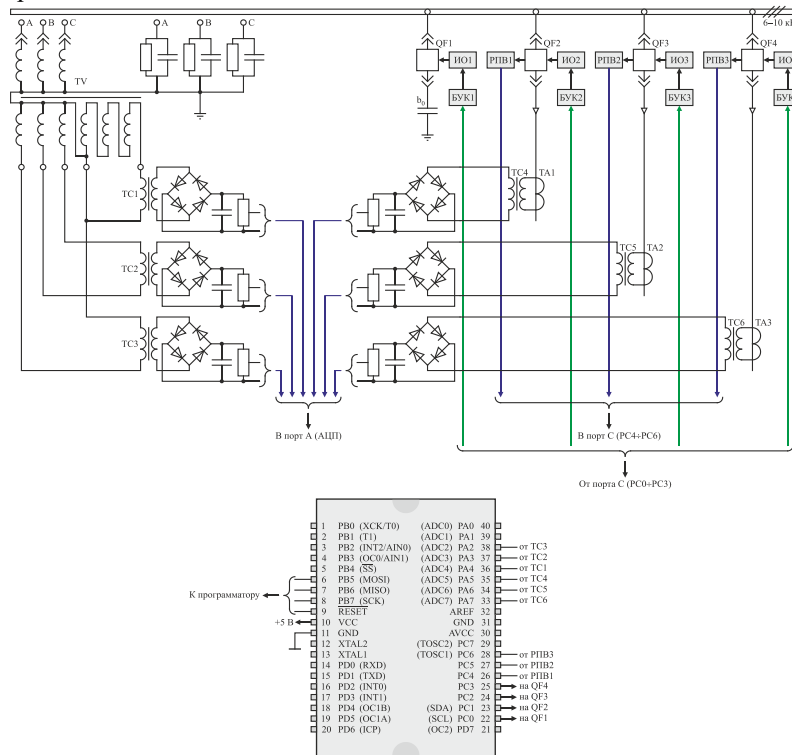


Рисунок 2 – Схема защиты на основе микроконтроллера Atmega8535

Структура микроконтроллера, способы управления АЦП и инициализации портов ввода и вывода описаны в литературе [7; 8]. При написании программного кода учитывались следующие настройки микроконтроллера:

1) Порт А настроен на ввод и аналого-цифровое преобразование сигналов:

- напряжение фазы А относительно земли с вывода PA2;
- линейное напряжение с вывода PA3;
- напряжение нулевой последовательности с вывода PA4;
- ток первого фидера с вывода PA5;
- ток второго фидера с вывода PA6;

- ток третьего фидера с вывода PA7.
- 2) Порт В подключен к дисплею.
- 3) Порт С настроен на ввод и вывод:

- включение/отключение линии с дополнительной емкостной проводимостью с вывода PC0;
- включение/отключение первого фидера с вывода PC1;
- включение/отключение второго фидера с вывода PC2;
- включение/отключение третьего фидера с вывода PC3;
- сигнал от РПВ первого фидера с вывода PC4;
- сигнал от РПВ второго фидера с вывода PC5;
- сигнал от РПВ третьего фидера с вывода PC6.

Результаты и обсуждение

Составлена программа устройства на языке Си [9; 10], листинг которой в приведен в таблице 1.

Таблица 1 – Листинг программного кода устройства

Программный код	Пояснения
#include <mega8535.h>	
#include <delay.h>	
#include <stdio.h>	
#asm	
.equ _lcd_port=0x18 ;PORTB	ЖКИ подключен к порту В
#endasm	
#include <lcd.h>	
#define ADC_VREF_TYPE 0x00	
unsigned int read_adc(unsigned char adc_input)	подпрограмма чтения АЦП
{	
ADMUX=adc_input ADC_VREF_TYPE;	
ADCSRA =0x40;	
while ((ADCSRA & 0x10)==0);	
ADCSRA =0x10;	
return ADCW;	
}	
void main(void)	
{	
float bo= .000157;	величина дополнительной емкостной проводимости $b_0 = 0,157 \cdot 10^{-3}$ См
unsigned short ku=2500;	коэффициент трансформации
float Uo, Ulin, Uph, I1, I2, I3, I0;	объявление переменных
unsigned char k1, k2;	
char buffer[255];	

PORTA=0x00;	инициализация порта А
DDRA=0x00;	
PORTC=0x0E;	инициализация порта С
DDRC=0x0F;	
ADMUX=ADC_VREF_TYPE;	инициализация АЦП
ADCSRA=0x85;	
SFIOR&=0xEF;	
lcd_init(16);	инициализация ЖКИ
while (1)	
{	
label1:	метка 1
k1=PINC&0x70;	считывание и запись сигналов с РПВ
PORTC.0=1;	подключение $b_0$ к фазе А сети
delay_ms(50);	выдержка времени на подключение $b_0$
Uo=read_adc(4);	преобразование и запись в переменную значения $U_0$ с канала 4 АЦП
Ulin=read_adc(3);	преобразование и запись в переменную значения $U_d$ с канала 3 АЦП
Uph=read_adc(2);	преобразование и запись в переменную значения $U_{ф0}$ с канала 2 АЦП
PORTC.0=0;	отключение $b_0$
I0=3*bo*ku*Ulin*Uph/Uo;	вычисление величины тока ОЗЗ (уставки тока)
_lcd_ready();	
lcd_clear();	
sprintf(buffer, "current: %fA", I0);	
lcd_puts(buffer);	вывод на дисплей значения $I_0$
label2:	метка 2
I1=read_adc(5);	преобразование и запись в переменную значения тока первой линии $I_1$ с канала 5 АЦП
I2=read_adc(6);	преобразование и запись в переменную значения тока второй линии $I_2$ с канала 6 АЦП
I3=read_adc(7);	преобразование и запись в переменную значения тока третьей линии $I_3$ с канала 7 АЦП
if(I1>=I0) goto label3; else	сравнение значения $I_1$ с уставкой
if(I2>=I0) goto label4; else	сравнение значения $I_2$ с уставкой
if(I3>=I0) goto label5; else	сравнение значения $I_3$ с уставкой
k2=PINC&0x70;	считывание и запись сигналов с РПВ
if(k1!=k2) goto label1;	сравнение k1 и k2, то есть наличие изменения в количестве работающих линий
else goto label2;	переход к метке 2
label3:	метка 3
PORTC.1=0;	отключение поврежденной линии 1
delay_ms(50);	выдержка времени на отключение линии 1

goto label1;	переход к метке 1
label4:	метка 4
PORTC.2=0;	отключение поврежденной линии 2
delay_ms(50);	выдержка времени на отключение линии 2
goto label1;	переход к метке 1
label5:	метка 5
PORTC.3=0;	отключение поврежденной линии 3
delay_ms(50);	выдержка времени на отключение линии 3
goto label1;	переход к метке 1
return;	
};	
}	

Выводы PB5 (MOSI), PB6 (MISO), PB7 (SCK) и RESET подключаются к программатору. Приведенная выше программа перед записью в память микроконтроллера подлежит компиляции для анализа, проверки синтаксиса, выявления возможных ошибок и преобразования программы в машинный код. Программирование осуществляется внутрисхемным способом через коммуникационный интерфейс SPI.

#### Выводы

Разработанное программное обеспечение устройства централизованной защиты от ОЗЗ с автоматическим изменением уставки тока на основе применения микроконтроллера Atmega8535 позволяет реализовать устройство согласно заданному алгоритму, исключить ложное срабатывание защиты в неповрежденных присоединениях в случае возникновения ОЗЗ и повышает селективность защиты.

#### СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1 Achitaev, A. A., Suslov, K. V., Volkova, I. O., Kozhemyakin, V. E., Dvoryansky, Y. V. Development of an algorithm for identifying single-phase ground fault conditions in cable and overhead lines in the networks with isolated neutral [Text], Energy Reports, Volume 9, Supplement 1, 2023, Pages 1079-1086, <https://doi.org/10.1016/j.egy.2023.01.046>.

2 Kachesov, V., Lebedev, A., Kitova, E. Monitoring in 6–35 kV power networks, location of single-phase ground fault and detection of fault feeder [Text], International Journal of Electrical Power & Energy Systems, Volume 152, 2023, 109271, <https://doi.org/10.1016/j.ijepes.2023.109271>.

3 Zhumadirova, A., Markovskiy, V., Kislov, A. Simulation of single-phase ground short circuit protection device [Text], E3S Web of Conferences 288, 01038



(2021), International Symposium «Sustainable Energy and Power Engineering 2021» (SUSE-2021), <https://doi.org/10.1051/e3sconf/202128801038>.

4 **Саятов, Ә. А., Жумадилова, А. К.** Разработка устройства автоматического определения параметров изоляции электрических сетей [Текст] // Вестник ПГУ. Энергетическая серия. – 2018. – № 3. – С. 144-152.

5 **Жумадилова, А. К.** Математическая модель устройства контроля состояния изоляции и тока однофазного замыкания на землю [Текст] // Вестник Торайгыров университета. Энергетическая серия. – 2024. – № 3. – С. 83-101.

6 **Утегулов, Б. Б., Марковский, В. П., Жумадилова, А. К.** Анализ сети Петри устройства контроля состояния изоляции и тока однофазного замыкания на землю в электрических сетях напряжением 6-10 кВ [Текст] // Материалы 11 МНПК «Проблемы и достижения в промышленной энергетике ПДЭ-11» в рамках выставки «Энергетика и электротехника – 2012». – Екатеринбург, 2012. – С. 22-27.

7 **Белов, А. В.** Микроконтроллеры AVR : от азов программирования до создания практических устройств : учебное пособие [Текст]. – Санкт-Петербург : Наука и техника, 2016. – 544 с.

8 **Хартов, В. Я.** Микроконтроллеры AVR в проектах и упражнениях : учебное пособие [Текст]. – М. : Издательство МГТУ им. Н. Э. Баумана, 2022. – 288 с.

9 **Рацева, С. М.** Программирование на языке Си : учебное пособие [Текст]. – М. : Издательство ЛАНЬ, 2023. – 330 с.

10 **Подбельский, В. В., Фомин, С. С.** Курс программирования на языке Си : учебное пособие [Текст]. – М. : ДМК Пресс, 2012. – 386 с.

## REFERENCES

1 **Achitaev, A. A., Suslov, K. V., Volkova, I. O., Kozhemyakin, V. E., Dvoryansky, Y. V.** Development of an algorithm for identifying single-phase ground fault conditions in cable and overhead lines in the networks with isolated neutral [Text], Energy Reports, Volume 9, Supplement 1, 2023, Pages 1079-1086, <https://doi.org/10.1016/j.egy.2023.01.046>.

2 **Kachesov, V., Lebedev, A., Kitova, E.** Monitoring in 6–35 kV power networks, location of single-phase ground fault and detection of fault feeder [Text], International Journal of Electrical Power & Energy Systems, Volume 152, 2023, 109271, <https://doi.org/10.1016/j.ijepes.2023.109271>.

3 **Zhumadirova, A., Markovskiy, V., Kislov, A.** Simulation of single-phase ground short circuit protection device [Text], E3S Web of Conferences 288, 01038

(2021), International Symposium «Sustainable Energy and Power Engineering 2021» (SUSE-2021), <https://doi.org/10.1051/e3sconf/202128801038>.

4 **Sayatov, Ә. А., Zhumadirova, A. K.** Razrabotka ustroystva avtomaticheskogo opredeleniya parametrov izolyatsii elektricheskikh setei [Development of a device for automatic determination of insulation parameters of electric networks] [Text] // Vestnik PGU. Energeticheskaya seriya. – 2018. – № 3. – P. 144-152.

5 **Zhumadirova, A. K.** Matematicheskaya model' ustroystva kontrolya sostoyaniya izolyatsii i toka odnofaznogo zamykaniya na zemlyu [Mathematical model of the insulation condition and single-phase short circuit to ground current monitoring device] [Text] // Vestnik Toraigyrov universiteta. Energeticheskaya seriya. – 2024. – № 3. – P. 83-101.

6 **Utegulov, B. B., Markovskii, V. P., Zhumadirova, A. K.** Analiz seti Petri ustroystva kontrolya sostoyaniya izolyatsii i toka odnofaznogo zamykaniya na zemlyu v elektricheskikh setyakh napryazheniem 6-10 kV [Petri net analysis of insulation condition and single-phase short circuit to ground current monitoring devices in 6-10 kV electrical networks] [Text] // Materialy 11 MNPК «Problemy i dostizheniya v promyshlennoi energetike PDE-11» v ramkakh vystavki «Energetika i elektrotehnika – 2012». – Ekaterinburg, 2012. – P. 22-27.

7 **Belov, A. V.** Mikrokontrollery AVR : ot azov programmirovaniya do sozdaniya prakticheskikh ustroystv : uchebnoe posobie [AVR microcontrollers : from the basics of programming to the creation of practical devices : textbook] [Text]. – Sankt-Peterburg : Nauka i tekhnika, 2016. – 544 p.

8 **Khartov, V. Ya.** Mikrokontrollery AVR v proektakh i uprazhneniyakh : uchebnoe posobie [AVR microcontrollers in projects and exercises : textbook] [Text]. – M. : Izdatel'stvo MGTU im. N. E. Baumana, 2022. – 288 p.

9 **Ratseeva, S. M.** Programmirovaniye na yazyke Si : uchebnoe posobie [Programming in C : textbook] [Text]. – M. : Izdatel'stvo LAN', 2023. – 330 p.

10 **Podbel'skii, V. V., Fomin, S. S.** Kurs programmirovaniya na yazyke Si : uchebnoe posobie [C Programming course : textbook] [Text]. – M. : DMK Press, 2012. – 386 p.

Поступило в редакцию 04.02.25

Поступило с исправлениями 18.02.25

Принято в печать 10.03.25

*А. К. Жұмадирова*

Торайғыров университет, Қазақстан Республикасы, Павлодар қ.

04.02.25 ж. баспаға түсті.

18.02.25 ж. түзетулерімен түсті.

10.03.25 ж. басып шығаруға қабылданды.

### ТОҚ ТАҒАЙЫНДАМАСЫНЫҢ АВТОМАТТЫ ӨЗГЕРУІМЕН ЖЕРГЕ БІР ФАЗАЛЫ ТҰЙЫҚТАЛУДАН ҚОРҒАНЫСТЫ ЖҮЗЕГЕ АСЫРУ

Бұл мақалада өнеркәсіптік кәсіпорындардың электр желілерінде жерге бір фазалы тұйықталудан орталықтандырылған қорғаныс құрылғысының бағдарламалық жасақтамасы әзірленді.

Құрылғыны әзірлеудің негізі – кернеуі 6–10 кВ оқшауланған бейтарабы быр тарату электр желісінің конфигурациясы өзгерген кезде ЖБФТ тоғы бойынша қорғаныс тағайындамасының автоматты өзгеруімен желілерді жерге бір фазалық тұйықталудан (ЖБФТ) орталықтандырылған қорғаныс әдісі. Бұл әдісті қолдану жерге бір фазалы тұйықталудан қорғаныстың жоғары селективтілігін қамтамасыз етеді, бұл электр қондырғыларын пайдалану кезінде сенімділік пен қауіпсіздік деңгейін арттыруға көмектеседі.

Құрылғының жұмыс істеу алгоритмін жасау кезінде Петри түсті желілер теориясы қолданылды. Петри түсті желілер теориясы жүйелерді модельдеудің құрылымдық әдістеріне жақын, ол жақсы дамыған математикалық аппаратқа негізделген, сондықтан аналитикалық және имитациялық зерттеулер жүргізуге мүмкіндік береді.

Құрылғының элементтік базасын таңдағанда, микропроцессорларды қолданған жөн, өйткені олар жоғары сенімділікпен, қолданудың әмбебаптығымен, шағын өлшемдерімен және арзандығымен үлкен есептеу және логикалық мүмкіндіктерге ие. Атап айтқанда, AVR отбасының микроконтроллерлері үлкен жұмыс жылдамдығымен, үлкен әмбебаптығымен, жылдамдығымен ерекшеленеді. Талдау нәтижесінде Atmel Corporation Atmega8535 микроконтроллері құрылғыны іске асыру үшін ең оңтайлы болып таңдалды.

Кілтті сөздер: электр желісі, бір фазалы тұйықталу, орталықтандырылған қорғаныс, микроконтроллер, бағдарламалық жасақтама.

*A. K. Zhumadirova*

Toraighyrov University, Republic of Kazakhstan, Pavlodar

Received 04.02.25

Received in revised form 18.02.25

Accepted for publication 10.03.25

### IMPLEMENTATION OF PROTECTION AGAINST SINGLE- PHASE EARTH FAULT WITH AUTOMATIC CURRENT SETPOINT CHANGE

*This article develops software for centralized protection against single phase to earth fault in the electrical networks of industrial enterprises.*

*The basis for the development of the device is the method of centralized protection of lines against single phase to earth fault (SPE) with automatic change of protection set point on SPE current at change of configuration of distribution electric network with isolated neutral voltage 6-10 kV. The use of this method provides high selectivity of protection against single phase to earth fault, which helps to increase the reliability and level of electrical safety during operation of electrical installations.*

*The theory of colored Petri nets was used to develop the algorithm for the device's operation. The theory of colored Petri nets is close to the structural methods of modeling systems, it is based on a well-developed mathematical apparatus and therefore allows for analytical and simulation studies.*

*When choosing the element base of a device, it is most advisable to use microprocessors, since they have great computing and logical capabilities with high reliability, versatility of application, small size and low cost. In particular, the AVR family microcontrollers are characterized by high speed, great versatility, and high performance. As a result of the analysis, the Atmel Corporation Atmega8535 microcontroller was selected as the most optimal for the implementation of the device.*

*Keywords: electrical network, single to phase fault, centralized protection, microcontroller, software.*

<https://doi.org/>

**М. Г. Жумагулов<sup>1</sup>, \*А. Ө. Өмірбаева<sup>2</sup>**

<sup>1,2</sup>Евразийский национальный университет имени Л. Н. Гумилева,

Республика Казахстан, г. Астана

<sup>1</sup>ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-2702-7292>

<sup>2</sup>ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-5008-5135>

\*e-mail: [a.omerbaeva@mail.ru](mailto:a.omerbaeva@mail.ru)

## **ОБЗОР ТЕХНОЛОГИЙ ГАЗИФИКАЦИИ УГЛЯ И ИХ ПРИМЕНИМОСТЬ В УСЛОВИЯХ КАЗАХСТАНА. ЧАСТЬ 1**

*В данной статье анализируются основные аспекты и преимущества технологии газификации угля, а также обобщается международный опыт ее применения в различных странах. Особое внимание уделено одному из наиболее эффективных способов газификации угля, с подробным описанием физических и химических реакций, происходящих внутри газификатора. Также в работе акцентируется внимание на значимости технологии газификации угля для развития энергетической отрасли Казахстана с учетом ее роли в обеспечении энергетической безопасности, устойчивой экономики страны и снижении экологической нагрузки. В качестве решения для эффективного внедрения продуктов газификации предлагается последующее сжигание синтез-газа в комплексной парогазовой установке с полным циклом газификации, что позволит повысить энергетическую эффективность использования органического топлива для производства электроэнергии с 38% до 60%. Особую ценность технология представляет для центральных, северных и восточных регионов Казахстана, в которых отсутствует регулярное газоснабжение, но при этом имеются существенные запасы угля.*

*Этот обзор является ориентиром для дальнейших исследований в области технологии газификации угля с акцентом на ее роль в производстве экологически чистого топлива и сокращении выбросов парниковых газов, а также в контексте перехода к устойчивой энергетике.*

*Ключевые слова: газификация угля, газификатор, синтез-газ, уголь, паро-газовая установка*

### **Введение**

Несмотря на то, что уголь сам является ископаемым горючим сырьем, потенциально он способен выступать в качестве источника другой более удобной к применению и чистой химической продукции – синтез газа, получаемого в ходе газификации. Сжигание продукта газификации вместо самого угля может привести к снижению количества вредных выбросов. Газификация угля – это чистая технология использования угля, в ходе которой твердое органическое топливо превращается в синтез-газ. В условиях нарастающего мирового энергетического дефицита газификация угля приобретает особую актуальность в связи с необходимостью сокращения вредных выбросов при непрерывном росте спроса на энергию. Этот процесс позволяет значительно повысить эффективность использования органического топлива и снизить загрязнение окружающей среды по сравнению с прямым сжиганием угля.

### **Материалы и методы**

Согласно отчету Статистического обзора энергетики World RB (British Petroleum) за 2022 год, уголь остается одним из важнейших видов ископаемого топлива для многих стран, особенно для Китая и Индии [1]. Согласно данным World Energy Outlook CO2 Emissions 2021 [2], выбросы CO2 установили новый рекорд в 36,3 Гт в 2021 году, из которых 15,3 Гт приходится на сжигание угля, что составляет более 40% от общих мировых выбросов CO2 [3]. Угольные электростанции вырабатывают энергию путем прямого сжигания угля. Обычно эффективность угольной генерации составляет не более 40%, поэтому термическая конверсия угля с прямым сжиганием не является достаточно чистым и эффективным способом использования угля. В настоящее время самой эффективной технологией использования твердого топлива является его газификация с возможностью последующего сжигания при КПД, достигающем 60 %.

В 1999 году Национальная лаборатория энергетических технологий Министерства энергетики США и Совет по технологиям газификации разработали базу данных по 747 текущим проектам и 1741 газогенератору, в том числе 393 коммерческим с тепловой мощностью 104,7 ГВт. Планировалось построить 1370 газификаторов тепловой мощностью 147,4 ГВт (т). Их распределение тепловой производительности по 1950-2025 годам показано на рисунке 1[4].

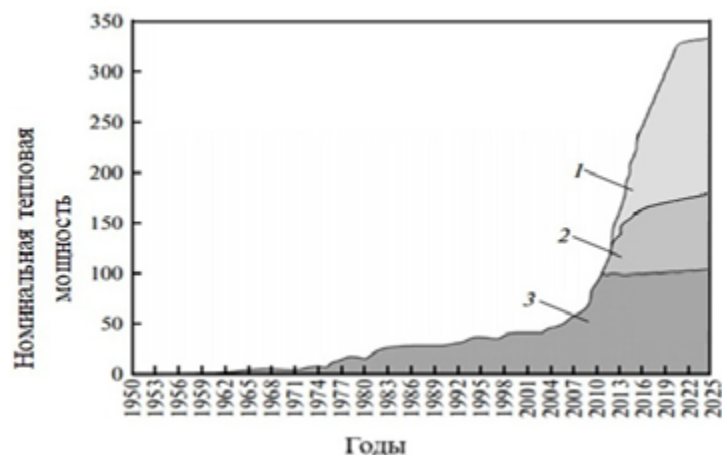


Рисунок – 1 Повышение общей термической эффективности газификаторов во всем мире. 1-запланировано; 2- построено; 3- эксплуатируется в текущем периоде.

В таблице 1 показаны крупнейшие газификационные предприятия в мире. Как видно из таблицы перечень продуктов газификации широко выходит за рамки только производства синтез газа. Например, в мире 25% общего объема производства аммиака и 35 % метанола приходится на газификацию. Наивысшие темпы развития углехимической отрасли сегодня демонстрирует Китай.

Таблица 1 – Крупные газификационные предприятия [4].

Наименование предприятия	Страна	Технология	Количество газификаторов	Тепловая мощность, МВт	Год ввода в эксплуатацию	Сырье	Продукты
Pearl GTL	Катар	Shell	18+0	10936	2011	ПГ	ЖТ
Yinchuan GTL	Китай	Siemens	22+2	9300	2016	Уголь	ЖТ
Datang Ningxia SNG	Китай	SEDIN	45+3	7125	2015	Лигнит	СГ
Sasol Synfuels West	ЮАР	Lurgi FBOB	40+0	7048	1977	Уголь	ЖТ
Sasol Synfuels East	ЮАР	Lurgi FBOB	40+0	7048	1982	Уголь	ЖТ
CHNG Xinjiang SNG	Китай	TPRI	7+1	6450	2014	Уголь	СГ
Jamnagar Gasification	Индия	E-Gas	6+2	5000	2015	НК	ЭЭ

Jazan IGCC	Сауд. Арабия	Shell	16+0	4465	2016	НК	ЭЭ
Yankunag Yulin GTL	Китай	OMB	8+0	3733	2015	Уголь	СО
Yulin Methanol Plant	Китай	General Electric	10+4	3383	2015	Уголь	Метанол
Luner Mongolia Chemical Plant	Китай	Shell	3+0	3373	2011	Лигнит	Метанол
Shenhua Ningxia	Китай	Siemens	5+0	1912	2011	Уголь	Метанол
Great Plains Synfuels Plant	США	Lurgi FBOB	12+2	1900	1984	Лигнит	СГ
Shenhua Baotou	Китай	General Electric	5+2	1750	2011	Уголь	Метанол
Hexigten SNG	Китай	SEDIN	12+2	1670	2012	Уголь	СГ
Sarlux IGCC	Италия	General Electric	3+0	1271	2000	ОМ	ЭЭ
ISAB Energy IGCC	Италия	General Electric	2+0	1203	1999	ОМ	ЭЭ
Sanwei Neimenggu	Китай	General Electric	4+2	1167	2011	Уголь	Метанол
Edwardsport IGCC	США	General Electric	2+0	1150	2012	Уголь	ЭЭ

ПГ-природный газ; СГ-синтез газ; НК-нефтяной кокс; ОМ- остатки масла; ЖТ-жидкое топливо; ЭЭ-электрическая энергия.

Сегодня развитие газификации угля в мире находятся на высоком уровне.

Китай является мировым лидером в газификации угля. В этой стране активно развиваются проекты, направленные на использование синтез-газа из угля для производства химической продукции (например, аммиака, метанола) и синтетического топлива. Программа газификации угля в Китае направлена на повышение энергетической безопасности и снижение зависимости от импорта нефти и газа. Ожидается, что в будущем китайская технология газификации будет способствовать более устойчивому использованию угля в энергетической и химической промышленности [5].

В Соединенных Штатах (США) газификация угля в основном используется в технологических исследованиях и некоторых проектах промышленной направленности. В частности, газификация угля рассматривается как важный элемент систем улавливания и хранения углерода (CCS). Примеры таких проектов включают газификацию угля в сочетании с производством энергии с минимизированными выбросами углекислого газа. Однако, по сравнению с более дешевыми альтернативами, такими как природный газ, газификация угля не пользуется широкой популярностью в США. Тем не менее, проекты, ориентированные на газификацию угля для сокращения выбросов углекислого газа, такие как Парогазовая установка с

внутренним циклом газификации (IGCC), такие проекты могут стать важной частью чистой экологической энергетики в будущем [6].

В Индии газификация угля используется как способ повышения энергетической безопасности, особенно в отдаленных районах с ограниченным доступом к природному газу. Индийские исследования по газификации угля направлены на повышение эффективности существующих технологий, а также на использование угольного синтез-газа для производства электроэнергии с использованием химических продуктов. В некоторых проектах используется сочетание газификации угля с возобновляемыми источниками энергии, включая солнечную, для повышения устойчивости энергосистемы [7].

ЮАР активно использует технологии газификации угля в промышленности, в том числе для производства синтетического топлива. Компания «Sasol» является лидером в производстве синтетических жидких углеводородов посредством процесса газификации угля. Это позволяет создать альтернативные виды топлива и снизить зависимость страны от традиционных, таких как нефть и газ [8].

Внутри газификатора угля происходит аллотермический процесс, поскольку для реакции необходим внешний источник теплоты с температурой 800-1300 °С. Этот процесс необходим для эндотермических реакций, требующих тепла для разложения угля на окись углерода, водород и другие компоненты.

В таблице 2 представлено большинство существующих и наиболее изученных технологий газификации. По каждой технологии анализируются особенности и требования к осуществлению процесса.

Таблица 2 – Сравнительный анализ

Метод газификации угля	Описание метода	Газификаторы	Температура	Недостатки
<b>Парокислородная газификация</b>	Использует пар и кислород для газификации	Shell [9], Texaco [10], Lurgi	900–1400	Высокая стоимость кислорода
<b>Воздушная газификация</b>	Использует воздух вместо кислорода	Lurgi, Koppers-Totzek [11]	800–1200	Низкая теплота сгорания газа из-за азота
<b>Плазменная газификация</b>	Использует плазменную дугу	Прототипы, исследовательские установки	1500–5000	Высокие энергозатраты

Подземная газификация	Газификация угля непосредственно в пласте	Советские и современные проекты	800–1200	Контроль процесса сложен
Паровая газификация	Использует только водяной пар	Winkler [12], Lurgi [13]	900–1200	Требуется дополнительная энергия для нагрева

По результатам анализа сведений в таблице 2 авторы статьи считают, что наиболее подходящая технология для условий Казахстана – это паровая газификация, т.к.

1 в качестве теплоносителя и реагента используется сравнительно доступный водяной пар;

2 данная технология по мнению большинства исследований наиболее подходящая для энергетических целей [14, 15];

3 одним из вариантов реализации данной технологии является газификатор Lurgi, который на сегодня наиболее изучен, надежен и доступен по цене и эксплуатационным расходам.

Среди всех существующих технологий газификации угля наиболее распространенным является процесс газификации угля в плотном слое под давлением. Начиная с 20 века, этот метод широко применяется многими предприятиями России и другими зарубежными странами. Среди различных вариантов газификации угля в плотном слое наиболее эффективной и надежной является схема газификации под давлением, называемая процессом Lurgi (рис. 2). Этот процесс зарекомендовал себя как одна из наиболее стабильных и передовых технологий получения синтез-газа с минимальными энергетическими затратами [16].



Рисунок 2 – Реакционные зоны в газификаторе

Внутри газификатора протекают физико-химические процессы, которые можно разделить на отдельные реакционные зоны [17]:

- Окислительная зона – зона частичного горения угля с тепловыделением (Q1, Q2);

- Восстановительная зона – зона восстановительных реакций с образованием горючих газовых компонентов (CO, H<sub>2</sub>). Данная эндотермическая стадия протекает с поглощением тепловой энергии;

- Зона выхода летучих – зона термического разложения угля с выходом горючих компонентов (CH<sub>4</sub>, H<sub>2</sub>, CO);

- Зона вывода итогового синтез газа.

Основные химические реакции представлены на самом рисунке 2.

При взаимодействии CO и H<sub>2</sub> в восстановительной зоне может образовываться метан, который способен термически распадаться в последствии на молекулярный водород и углерод в виде сажи.

### Результаты и обсуждение

Несмотря на развитие возобновляемой энергетики и реализацию политики «энергетического» перехода, уголь продолжает сохранять лидирующие позиции в мировой энергетике развитых стран. Энергетический кризис и проблемы с поставками природного газа в 2022 году показали, что уголь остается фактором, стабилизирующим энергетические рынки [18].

В настоящее время уголь широко используется в энергетических целях в северных, центральных и восточных областях Казахстана. Это не только оправдано отсутствием эффективных газовых энергоносителей, таких как природный газ, но также наличием угольных месторождений с существенными запасами. В балансе страны 49 месторождений угля. Доказанные запасы составляют 29,3 млрд тонн. Казахстан занимает десятое место в мире по запасам угля, которых с нынешними темпами добычи ориентировочно хватит на срок более 250 лет. Крупные угольные бассейны – Экибастузский (10,1 млрд т), Карагандинский (7,0 млрд т) и Торгайский (5,9 млрд т) – расположены в Центральной и северной частях Казахстана [18]. Суммарные доказанные, прогнозируемые и потенциальные запасы угля составляют около 150 миллиардов тонн. Согласно официальной статистике, в 2022 году добыто 113,9 млн тонн угля (без учета угольного концентрата), что составляет 102% по сравнению с 2021 годом (2020 год – 107,2 млн тонн, 2021 год – 111,7 млн тонн). В настоящее время 66,7% электроэнергии Казахстана обеспечивается угольной отраслью [19].

В последние годы в связи с устойчивым ростом цен на нефть, снижением запасов во многих странах ведется разведка новых угольных месторождений и процессы совершенствования и улучшения методов глубокой переработки угля. Для Казахстана интересен опыт стран, занимающих лидирующие позиции по добыче угля (Китай, США, Индия), которые, например, за счет государственных мероприятий разработали технологии глубокой переработки угля. Поэтому необходимо совершенствовать национальное законодательство, касающееся оказания государственной поддержки таким технологиям [19]. Переработка исходного топлива более предпочтительна в экономическом аспекте, так как добавленная стоимость продуктов переработки выше чем стоимость энергии (на продажу) при прямом сжигании.

Парижское климатическое соглашение послужило основой для разработки экстерриториальных схем и механизмов сокращения выбросов. Например, 16 мая 2023 года в ЕС вступил в силу трансграничный механизм управления углеродсодержащими выбросами. Согласно механизму, с 2026 года импорт отдельных видов продукции в ЕС будет облагаться пошлиной в соответствии с величиной, превышающей установленную норму выбросов парниковых газов при их производстве [18]. Основной проблемой в угольной промышленности является переход мировых тенденций к «зеленой экономике», что оказывает свое влияние на объемы потребления угля.

В соответствии с главой 3 (задача 3) «Стратегия устойчивой энергетики будущего Казахстана до 2050 года» необходимо внедрять чистые угольные технологии устойчивой энергетически, т. е. совершенствовать процессы газификации угля [20]. Такие технологии эффективны и оказывают меньшее

воздействие на окружающую среду по сравнению с прямым сжиганием угля. Этот технологический кластер предотвращает установку менее эффективных установок на основе угля и расширяет возможности преобразования угля в более полезный конечный продукт, тем самым способствуя постепенному отказу от его прямого использования.

Газификация угля является средством достижения вышеуказанных целей для чистых угольных технологий. Процесс газификации угля-это хорошо зарекомендовавшая себя технология, которая превращает твердое сырье (например, уголь, биомасса и пр.) в синтетический газ (синтез-газ) с использованием пара и окислителя. Чистый синтез-газ можно использовать непосредственно в качестве источника городского газоснабжения или в качестве топлива для производства теплоты и электроэнергии.

### Выводы

Стратегическим направлением развития мировой энергетики является внедрение парогазовых установок (ПГУ) при производстве электроэнергии и тепла. Данный подход позволяет значительно повысить коэффициент полезного действия (КПД) использования органического топлива для производства электроэнергии с 38% до 60%. ПГУ особенно актуальны для объектов энергетики, поскольку обеспечивают высокую экономическую эффективность, а также значительно снижают экологическую нагрузку по сравнению с традиционными паротурбинными установками [21].

Например, КПД паротурбинных (ПТ) или газовых турбин (ГТ) установок на угольных, мазутных и газовых электростанциях (включая ТЭЦ) не превышает 0,4, в то время как использование комбинированной парогазовой установки позволяет достичь КПД в пределах 0,58–0,62 [21].

На сегодняшний день в Казахстане парогазовые установки (ПГУ) активно эксплуатируются в западном регионе страны (Актюбинский завод ферросплавов). Планируется широкомасштабное внедрение технологии ПГУ в южных регионах страны на ТЭЦ г. Кызылорда и Шымкент. Однако в Центральном и Северном Казахстане эффективное внедрение ПГУ сталкивается с рядом трудностей, прежде всего из-за ограниченного доступа к природному газу. В этих областях газоснабжение осуществляется только в рамках начатых проектов, таких как магистральные газопроводы «Сарыарқа» и «Бейнеу-Бозой-Шымкент», что ограничивает возможности для широкомасштабного использования ПГУ.

Вместе с тем, для решения этой проблемы возможно применение синтетического газа, полученного из угля в процессе газификации. Использование такого газа в ПГУ позволит создать эффективные и экологически чистые энергетические установки, доступные в любом регионе Казахстана, имеющего запасы угля. Синтез газ может существенно снизить

зависимость от природного газа, обеспечивая стабильное энергоснабжение и одновременно способствуя улучшению экологической ситуации в стране за счет снижения выбросов вредных веществ. Таким образом, интеграция угольной газификации в парогазовую технологию представляет собой перспективное направление для устойчивого развития энергетической отрасли Казахстана.

В угольных газификаторах преобладают эндотермические реакции, которые требуют значительных затрат энергии для поддержания желаемой температуры. Среди таких реакций-процессы взаимодействия угля с паром и углекислым газом, в результате которых образуется синтез-газ (окись углерода, водород). Для обеспечения оптимальных температурных условий газификатор частично использует теплоту от сгорания угля, что покрывает расход энергии за счет его частичного сжигания. Однако на современном этапе развития технологии уголь можно объединять с альтернативными источниками теплоты, такими как солнечная энергия, для обеспечения дополнительного нагрева в процессе газификации. Учитывая его экологически чистый характер, солнечная энергия может повысить энергоэффективность газификационных установок при одновременном снижении потребности в традиционных источниках энергии. Применение солнца для частичного нагрева реактора газификации приведет к снижению расхода органического топлива на собственные нужды, а значит объёмы вредных выбросов снизятся.

### Будущие планы исследования

Вопрос использования солнечного тепла для угольной газификации будет более подробно рассмотрен во второй части данной работы в одном из будущих изданий научного журнала «Вестник ТоУ».

### СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1 BP Statistical Review of World Energy. 2022, 71st edition. Available online: <https://www.bp.com/statisticalreview> (accessed on 10 May 2023).

2 Sixth Assessment Report -IPCC: Technical Summary. 2021. Available online: <https://www.ipcc.ch/report/ar6/wg2/chapter/technical-summary/> (accessed on 10 May 2023)

3 Fei, D., Shengping, Z., Yuanpei, L., Ke, W., Yanrong, L., Xiaoyan, J. Recent Progress on Hydrogen-Rich Syngas Production from Coal Gasification. Processes 2023.

4 OI'khovskii, G. G. Solid Fuel Gasification in the Global Energy Sector (a Review)// Thermal Engineering, 2015, Vol. 62, No. 7, pp. 465–472. © Pleiades

Publishing, Inc., 2015. Original Russian Text © G.G. Ol'khovskii, 2015, published in *Теплоэнергетика*

5 Zhang, X., Liu, J., Zeng, M. Coal Gasification and Its Industrial Applications // *Energy & Fuels*, 2021.

6 Energy Information Administration (EIA). *Coal Gasification Technologies in the United States*. 2020.

7 Sharma, S., Kumar, A., Patel, D. Coal Gasification Technologies in India. *Energy Reports* 2019.

8 Meyer, C., Hofmann, G. Integrated Coal Gasification: A Clean Alternative // *International Journal of Energy Research* 2021.

9 He, X.-Y., Wen, Z.-N., Zhai, C., Zhu, Y.-Z., Nie, Y.-X., Mei, Y. Fluid flow characteristics and coal gasification performance under various injection patterns in a Shell gasifier. *Chemical Engineering Science*. Available online 3 March 2025.

10 Miao, Z., Guo, F., Zhao, X., Guo, Z., Guo, Y., Zhang, Y., Wu, J. Effects of acid treatment on physicochemical properties and gasification reactivity of fine slag from Texaco gasifier. *Chemical Engineering Research and Design*. May 2021, –1-8 p.

11 Rosen, M. A., Scott, D. S. An energy-exergy analysis of the Koppers-Totzek process for producing hydrogen from coal. *International Journal of Hydrogen Energy*. 1987, –837-845 p.

12 Heinze C., May J., Langner E., Ströhle J., Epple B. High Temperature Winkler gasification of Rhenish lignite in an optimized 500 kWth pilot plant. *Fuel*. February 2023.

13 He, C., Xiao, F., Chu, K.-H. Process modeling and thermodynamic analysis of Lurgi fixed-bed coal gasifier in an SNG plant. *Applied Energy*. November 2013, –742-757 p.

14 *Oil and Gas J.*, 1993, April 12. –85 p.

15 Extended Abstracts and Programme of Symp. «Science and Technology of Carbon», Strasbourg, France, July 1998. – V. II. – 894 p.

16 Загруднинов, Р.Ш. Исследование технологического режима газогенераторов Лурги при паракислородной газификации углей под давлением // Автореф. диссерт. на соиск. уч. ст. канд. тех. наук. Барнаул, 2010. – 6–7 с.

17 Загруднинов, Р.Ш., Нагорнов, А.Н., Сеначин, П.К. Наладочные испытания газогенераторов Лурги и перспективы газогенераторных технологий // *Ползуновский Вестник* №3 2007. – 40с.

18 Национальный энергетический доклад KAZENERGY 2023 <https://www.kazenergy.com/ru>

19 Проект Концепции цифровизации энергетической системы Казахстана [https://www.kazenergy.com/upload/document/electric/razvitie\\_konc\\_2.pdf](https://www.kazenergy.com/upload/document/electric/razvitie_konc_2.pdf)

20 Абыкаев, Н.А., Бектурганов, Н.С., Зейнуллин, А.А., Кузнецов, О.Л., Спицын, А.Т., Шеулин, А.С. Проект «Стратегии устойчивой энергетики будущего Казахстана до 2050 года».

21 Достияров, А.М., Омербаева, А.О. К вопросу газификации углей месторождений Казахстана. *Фундаментальные и прикладные науки сегодня* // *Материалы VII международной научно-практической конференции*. North Charleston, USA, 2015. – 117 с.

## REFERENCES

1 BP Statistical Review of World Energy. 2022, 71st edition. Available online: <https://www.bp.com/statisticalreview> (accessed on 10 May 2023).

2 Sixth Assessment Report -IPCC: Technical Summary. 2021. Available online: <https://www.ipcc.ch/report/ar6/wg2/chapter/technical-summary/> (accessed on 10 May 2023).

3 Fei, D., Shengping, Zh., Yuanpei, L., Ke, W., Yanrong, L., Xiaoyan, J. Recent Progress on Hydrogen-Rich Syngas Production from Coal Gasification. *Processes* 2023.

4 Ol'khovskii, G. G. Solid Fuel Gasification in the Global Energy Sector (a Review) // *Thermal Engineering*, 2015, Vol. 62, No. 7, pp. 465–472. © Pleiades Publishing, Inc., 2015. Original Russian Text © G.G. Ol'khovskii, 2015, published in *Теплоэнергетика*.

5 Zhang, X., Liu, J., Zeng, M. Coal Gasification and Its Industrial Applications // *Energy & Fuels*, 2021.

6 Energy Information Administration (EIA). *Coal Gasification Technologies in the United States*, 2020.

7 Sharma, S., Kumar, A., Patel, D. Coal Gasification Technologies in India // *Energy Reports* 2019.

8 Meyer, C., Hofmann, G. Integrated Coal Gasification: A Clean Alternative // *International Journal of Energy Research*, 2021.

9 He, X.-Y., Wen, Z.-N., Zhai, C., Zhu, Y.-Z., Nie, Y.-X., Mei, Y. Fluid flow characteristics and coal gasification performance under various injection patterns in a Shell gasifier. *Chemical Engineering Science*. Available online 3 March 2025.

10 Miao, Z., Guo, F., Zhao, X., Guo, Z., Guo, Y., Zhang, Y., Wu, J. Effects of acid treatment on physicochemical properties and gasification reactivity of fine slag from Texaco gasifier. *Chemical Engineering Research and Design*. May 2021, –1-8 p.

11 Rosen, M. A., Scott, D. S. An energy-exergy analysis of the Koppers-Totzek process for producing hydrogen from coal. *International Journal of Hydrogen Energy*. 1987, –837-845 p.



12 **Heinze C., May J., Langner E., Ströhle J., Epple B.** High Temperature Winkler gasification of Rhenish lignite in an optimized 500 kWth pilot plant. Fuel. February 2023.

13 **He, C., Xiao, F., Chu, K.-H.** Process modeling and thermodynamic analysis of Lurgi fixed-bed coal gasifier in an SNG plant. Applied Energy. November 2013, –742-757 p.

14 **Oil and Gas J.**, 1993, April 12. –85 p.

15 Extended Abstracts and Programme of Symp. «Science and Technology of Carbon», Strasbourg, France, July 1998. – V. II. – 894 p.

16 **Zagrutdinov, R.Sh.** Issledovanie tekhnologicheskogo rezhima gazogeneratorov Lurgi pri parakislородной gazifikatsii ugley pod davleniem. Avtoref. dissert. na soisk. uch. st. kand. tekhn. nauk. Barnaul., 2010. – 6–7 p. [Study of the Technological Regime of Lurgi Gas Generators in the Oxygen-Pressure Coal Gasification Process].

17 **Zagrutdinov, R.Sh., Nagornov, A.N., Senachin, P.K.** Naladochnye ispytaniya gazogeneratorov Lurgi i perspektivy gazogeneratornykh tekhnologiy. Polzunovskiy Vestnik №3 2007. – 40p. [Load Testing of Lurgi Gas Generators and Prospects of Gas Generator Technologies].

18 Natsional'nyy energeticheskiy doklad. KAZENERGY 2023 <https://www.kazenergy.com/ru> [National Energy Report. KAZENERGY 2023].

19 Proyeckt Kontseptsii tsifrovizatsii energeticheskoy sistemy Kazakhstana. [https://www.kazenergy.com/upload/document/electric/razvitiye\\_konc\\_2.pdf](https://www.kazenergy.com/upload/document/electric/razvitiye_konc_2.pdf) [Project of the Concept of Digitalization of Kazakhstan's Energy System].

20 **Abykaev, N.A., Bekturganov, N.S., Zeynullin, A.A., Kuznetsov, O.L., Spitsin, A.T., Sheulin, A.S.** Proyeckt «Strategii ustoychivoy energetiki budushchego Kazakhstana do 2050 goda» [Project «Strategy for Sustainable Energy of Kazakhstan until 2050»].

21 **Dostiyarov, A.M., Omirbayeva, A.O.** K voprosu gazifikatsii ugley mestorozhdeniy Kazakhstana. Fundamental'nye i prikladnye nauki segodnya. Materialy VII mezhdunarodnoy nauchno-prakticheskoy konferentsii. North Charleston, USA, 2015. – 117 p. [On the Issue of Coal Gasification in the Deposits of Kazakhstan. Fundamental and Applied Sciences Today. Proceedings of the VII International Scientific and Practical Conference].

Поступило в редакцию 29.01.25  
Поступило с исправлениями 07.02.25  
Принято в печать 03.03.25

*М. Г. Жұмагулов<sup>1</sup>, \*А. Ө. Өмірбаева<sup>2</sup>*

<sup>1,2</sup>Л. Н. Гумилев атындағы Еуразия ұлттық университеті,

Қазақстан Республикасы, Астана қ.

29.01.25 ж. баспаға түсті.

07.02.25 ж. түзетулерімен түсті.

03.03.25 ж. басып шығаруға қабылданды.

## **КӨМІРДІ ГАЗИФИКАЦИЯЛАУ ТЕХНОЛОГИЯЛАРЫНА ШОЛУ ЖӘНЕ ОЛАРДЫҢ ҚАЗАҚСТАН ЖАҒДАЙЫНДА ҚОЛДАНЫЛУЫ. 1 БӨЛІМ**

*Бұл мақалада көмірді газификациялау технологиясының негізгі аспектілері мен артықшылықтары талданады, сонымен қатар оны әр түрлі елдерде қолданудың халықаралық тәжірибесі жинақталады. Көмірді газификациялаудың ең тиімді әдістерінің біріне ерекше назар аударылады, газификатор ішінде болатын физикалық және химиялық реакциялар толық сипатталады. Сондай-ақ, жұмыста энергетикалық қауіпсіздікті, елдің тұрақты экономикасын қамтамасыз етудегі және экологиялық жүктемені төмендетудегі рөлін ескере отырып, Қазақстанның энергетика саласын дамыту үшін көмірді газификациялау технологиясының маңыздылығына назар аударылады.*

*Бұл шолу көмірді газификациялау технологиясы саласындағы оның таза отын өндірудегі және парниктік газдар шығарындыларын азайтудағы рөліне, сондай-ақ тұрақты энергетикаға көшу контекстінде баса назар аудара отырып, одан әрі зерттеулерге бағыт береді. Газификация өнімдерін тиімді енгізудің шешімі ретінде толық газификациялау циклі бар кешенді бу газ қондырғысында синтез-газды жағу ұсынылады, бұл электр энергиясын өндіру үшін органикалық отынды пайдаланудың энергетикалық тиімділігін 38%-дан 60%-ға дейін арттыруға мүмкіндік береді. Қазақстанның орталық, солтүстік және шығыс өңірлері тұрақты газбен жабдықталмағандықтан, бірақ көмірдің елеулі қорлары болғандықтан бұл құнды технология болып табылады.*

*Кілтті сөздер: көмір газификациясы, газификатор, синтез-газ, көмір, бу газды қондырғы.*

M.G. Zhumagulov<sup>1</sup>, \*A. O. Omirbayeva<sup>2</sup>

<sup>1,2</sup>Eurasian national university named after L. N. Gumilyov,

Republic of Kazakhstan, Astana

Received 29.01.25

Received in revised form 07.02.25

Accepted for publication 03.03.25

## REVIEW OF COAL GASIFICATION TECHNOLOGIES AND THEIR APPLICABILITY IN KAZAKHSTAN. PART 1

*This article analyzes the main aspects and advantages of coal gasification technology, as well as summarizes the international experience of its application in various countries. Special attention is paid to one of the most effective methods of coal gasification, with a detailed description of the physical and chemical reactions occurring inside the gasifier. The document also focuses on the importance of coal gasification technology for the development of Kazakhstan's energy sector, taking into account its role in ensuring energy security, a sustainable economy and reducing environmental load. As a solution for the effective implementation of gasification products, the subsequent combustion of synthesis gas in a complex combined-cycle gas plant with a full gasification cycle is proposed, which will increase the energy efficiency of using organic fuels for electricity generation from 38% to 60%. The technology is of particular value for the central, northern and eastern regions of Kazakhstan, which do not have regular gas supply, but have significant coal reserves.*

*This review provides guidance for further research on coal gasification technology, with a focus on its role in producing environmentally friendly fuels and reducing greenhouse gas emissions, as well as in the context of the transition to sustainable energy.*

*Keywords: coal gasification, gasifier, synthesis gas, coal, combined cycle gas plant.*

FTAMP 44.01.91

<https://doi.org/>

**\*Т. Ж. Жұмағұлов<sup>1</sup>, П. А. Танжариков<sup>2</sup>, Э. Ш. Елеуова<sup>3</sup>,  
А. М. Жабағиев<sup>4</sup>, Е. А. Назаров<sup>5</sup>.**

<sup>1,2,3,4,5</sup>Қорқыт Ата атындағы Қызылорда университеті,  
Қазақстан Республикасы, Қызылорда қ.

<sup>1</sup>ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-3048-6596>

<sup>2</sup>ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-6490-9972>

<sup>3</sup>ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-6488-2714>

<sup>4</sup>ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-7720-0911>

<sup>5</sup>ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-2368-6466>

\*e-mail: [temur\\_rngm@mail.ru](mailto:temur_rngm@mail.ru)

## **БРИКЕТТЕУДІҢ ТИІМДІ ТЕХНОЛОГИЯЛАРЫ: ЭНЕРГЕТИКАДА ӨНДІРІС ҚАЛДЫҚТАРЫН ПАЙДАЛАНУ**

*Бұл мақалада мұнай кен орындарында бөлінетін парафинді қалдықтарын, көмір қалдықтарын және ауылиаруашылық саласында күріш өндірісінен түзілетін қатты қалдықтарын екінші шикізат ресурстары ретінде қарастырып, тиімді пайдалану технологиясы қарастырылған. Өндірістік қалдықтардың қоршаған ортаға тигізетін әсерлері мен зардаптарына ғылыми тұрғыда талдау жүргізіле отырып, оларды әртүрлі өндірістік салаларда пайдалану жобалары ұсынылған.*

*Зерттеу жұмыстары мен тәжірибелік сынақтар жүргізу барысында өңірдің экологиялық мәселелері мен бірге брикеттелген отын алудың жолдары да анықталған. Жүргізілген зерттеу жұмыстарының жаңа ғылыми негізделген нәтижелері мен өндірісте түзілген қалдық түрлерін пайдалану тәсілдерінің зерттеу әдістемелері талданған. Атап айтқанда, оңтүстік Торғай ойпатында орналасқан мұнай кен орындарында түзілетін парафинді қалдықтарына, Шұбаркөл кенішінен алынған көмірдің ұнтақ қалдығына, сонымен бірге Қызылорда облысы аумағында өсірілетін күріш дақылдың сыртқы қауызына университетіміздің зертханасында физика-химиялық талдаулар жасалынды. Алынған мәліметтер бойынша математикалық есептеулер арқылы, тәжірибе жұмыстары*

барысында әр бір қоспалардың ылғалдылығы, температурасы және оларды арнайы дайындалған стандартты ыдыстарға салынып, әр түрлі қысымдарда сығу арқылы олардың беріктіктеріне бірнеше рет сынақтар өткізілген.

Сонымен бірге брикеттелген отынның жаңа түріне энергетикалық тұрғыда баға беру мақсатында жану жылуын есептеулер жүргізілген. Брикет отынның құрамына кіретін әрбір қоспалардың салмақтық үлестерін мүмкін болатын аралықта өзгерте отырып, әрқайсысының концентрациялары анықталған. Барлық есептеу жұмыстары компьютерлік бағдарламалар арқылы жүргізілген. Жүргізілген ғылыми зерттеу жұмыстарының нәтижесінде, еліміздің экологиялық мәселелерін шешу мен бірге энергетикалық жағынан отынның жаңа түрін алу технологиялары ұсынылған.

*Кілтті сөздер: мұнай, көмір, өндіріс қалдықтары, брикет, АШПШ, күріш қауызы, технология.*

### Кіріспе

Дүние жүзі бойынша мұнай-газ және көмір өндіру энергетика саласында өте маңызды орын алады, әсіресе әлемдік энергетика балансын анықтайтын негізгі энергия көздерінің бірі болып табылады. Олардың орнын келесі негізгі факторлармен сипаттауға болады, атап айтатын болсақ, **энергия өндірісінде** мұнай, газ және көмір шикізаттары әлемдегі электр энергиясын өндірудің, жылу генерациясының және көлік секторының негізгі энергия көздері болып табылады. Олардың көмегімен жылу энергиясын өндіріп, содан кейін электр энергиясын алуға болады немесе тікелей жылу ретінде пайдаланылады.

Сонымен бірге мұнай-газ және көмір кен орындарының елімізде көптеп орналасуы экономикалық **тиімділігімен бірге аталған шикізаттарды өндіру, жинау, тасымалдау барысында экологиялық мәселелерді де туындататыны белгілі**. Бұл әлемдік қоғамдастықтың алдында тұрған негізгі мәселелердің бірі және жаңартылатын энергия көздерінің дамуын жеделдетуге септігін тигізеді. Осыған байланысты, мұнай-газ және көмір өндіру энергетика саласында өте маңызды рөл атқарады десек те, олардың қоршаған ортаға кері әсері ескерілуі керек [1, 48-64-бб.].

Еліміздің мұнай кен орындары орналасқан аймақтардағы парафинді қалдықтарды жерге төкпей, оларды жинастырып, қайта өңдеу арқылы табиғи ортамызды зиянды заттардан қорғау біздің негізгі мақсат-міндеттеріміздің бірі болып табылады. Бұл процесс экономикалық тиімділікпен қатар, экологиялық жағынан қоршаған ортамызды ластанудан қорғап, табиғи ортаның тұрақтылығын қамтамасыз етуге септігін тигізеді. Қазіргі кезде жеке

кәсіпорындардың көпшілі мұнайдан бөлінген қатты парафинді қалдықтарды жою мақсатында әртүрлі әдістерді (пеште жағу, жерге көму) қолданып шешуге тырысуда [2, 1174-1182-бб.]. Алайда, әдістердің бұл түрлері экономикалық тұрғысынан мекемеге пайда түсірмейді, керісінше экологиялық зиянын тигізеді. Өндірістерден бөлінетін техногендік қалдықтардың көлемін төмендету үшін, біз - қалдықтардың физика және химиялық қасиеттерін анықтап алуымыз қажет. Сол арқылы, оларды қайта кәдеге жарайтын шикізат көзі ретінде пайдалануға болатынын анықтаймыз және өндіріске жарамды өнім алу жолдарын қарастырамыз. Аталған мәселелер толық шешілген жағдайда, өңірдің отын-энергетикалық саласының дамуына және экологиялық мәселелердің бір бөлігін болса да шешуге үлесімізді қоса аламыз [3, 120-128 бб].

### Материалдар мен әдістері

Брикеттеу арқылы отынның жаңа түрін алу саласы бойынша жасалған техникалық шешімдерді талдай отырып, битумнан жасалған байланыстырғыш қоспаларды АШПШ (асфальт-шайырлы-парафинді шөгінділері) алмастырудың теориялық нәтижелері алынды. Басылымдарда жарияланған ғылыми әдебиеттердегі мәліметтерге сүйенсек, АШПШ қоспа материалдарды байланыстырғыш бола алады екен. Битумды қолдануда оның салмақтық үлесі 6-8% емес, одан да көп, яғни 15%-дан асып кетуі (67%-ға дейін) мүмкін. Брикеттелген отын жасауда АШПШ қолданудың басқа да маңызды шарттарының бірі – оның құрамында органикалық заттардың жоғары болуы және олардың калориясының жоғары болуы [4].

АШПШ-нің аққыштық, жабысқақтық және механикалық қасиеттеріне байланысты, оларды қатты брикеттелген отын түрін алу мақсатында пайдалануға болатынын көрсетті. Осы қасиеттері арқылы когезия мен жылу бөле алатын қабілеттері бар байланыстырушы қоспа зат ретінде бағалау мүмкіндігі берілді [5, 299-б].

Көмір брикеттері мақсаттарына қарай екі топқа бөлінеді: тұрмыстық және өнеркәсіптік. Өнеркәсіптік брикеттер, өз кезегінде, қоңыр көмірді жартылай кокстеу мен тас көмірлерді кокстеу үшін пайдаланылады. Бұл брикеттердің формалары әртүрлі: дөңгелек, кірпіш тәрізді, текше тәрізді және т.б. [6, 344-б].

Брикет отындарының негізгі талаптары:

- 1) атмосфералық ауаға шыдамды болуы;
- 2) механикалық беріктікке шыдамды болуы;
- 3) жағу кезінде арасымен газдың өтуін қамтамасыз етуі;
- 4) жоғары температураға шыдамды болуы, яғни бұзылмауы қажет.

Брикеттеудің теориялық негіздері өнеркәсіптік даму процесінде құрылды [7, 40-б]. Көмірдің әртүрлі алуан түрлеріне, сондай-ақ олардың

физика-химиялық және механикалық беріктілік қасиеттеріне қарамастан, зерттеуші ғалымдар маркалары әр түрдегі көмір ұнтағын брикеттеудің негізгі ережелері мен алғы шарттарын әзірледі. Осы күрделі процестердің теориялық және практикалық заңдылықтарын өз беттерінше дамытуға өз үлестерін қосуда [8].

Шұбаркөл көмірінің жану жылуы орташа 5600-6000 ккал/кг, күлдің бөлінуі 2-4%, ұшқыштығы 47%. Брикеттеу мүмкіндігі бірінші кезекте әзірленген әдістемелерге сай құрғақ көмір ұнтағын зерттеу арқылы анықталды. Тәжірибе үшін қалыпты температурада (+200С) ұзақ уақыт бойы сақталған, өлшемі 5÷1 мм-ге дейінгі ұсақталған құрғақ көмір пайдаланылды. Көмірді түйіршіктеу құрамы 1-кестеде берілген.

Кесте 1 – Зерттеу мақсатындағы көмірді түйіршіктеу құрамы

Реттілік	Түйіршіктер өлшемі, мм						Барлығы	
	г	%	г	%	г	%	г	%
1	98,94	19,75	331,48	66,32	69,58	13,92	500	100
2	109,88	21,98	361,95	72,38	28,17	5,59	500	100
3	145,98	29,21	298,02	59,58	56,00	10,21	500	100
4	107,13	21,39	360,91	72,21	31,96	6,38	500	100
Орташа	115,48	23,08	338,16	67,62	46,36	9,02	500	100

ГОСТ 21289-75 сәйкес сығу сынақтарын жүргізу мақсатында шихтаның тиімді құрамын анықтау үшін, брикет отынының беріктігінің орташа мәндері анықталды және 7 үлгісі жасалнып сынақтан өтті. Сынақ барысында құрғақ көмірді 60-тан 130МПа-ға дейін престау қысымы анықталды [9, 251-259-бб].

Брикет құрамының негізі АШПШ, көмір ұнтағы және күріш қауызынан тұрады. Осы жоспарланған брикет отыны үшін жану жылуын табу мақсатында төменде келтірілген формула қолданылады. Отынның жану жылуы дегеніміз — 1 кг отынды жаққан кезде, одан бөлініп шығатын энергияның мөлшерін айтамыз. Отын жанған кездегі бөлінетін жылудың төменгі мәндері, ол отынның маңызды қасиеттерінің бірі болып есептеледі және әр отын түрі үшін нақты тәжірибелер арқылы анықталады. Отынның элементтік құрамы белгілі болса, оның жану жылуының мөлшерін Д.И. Менделеевтің теңдеуі арқылы есептеуге болады (кДж/кг, ккал/кг) [10, 44-47-бб.]:

$$Q_{HP} = 339CP + 1256HP - 109(OP + SLP) - 25,14(9HP + WP)$$

CP, HP, OP, SLP, WP — отынның құрамындағы көміртек, сутек, оттегі, күкірт және ылғалдылық мәні (салмақ үлесі %).

Нәтижелер және талқылау

Брикет отынының құрамына кіретін әрбір қоспаның мөлшерін мүмкін болатын аралықта өзгерте отырып, жану жылуын есептеу жүргізіледі. Әрбір қоспаның мөлшері жеке-жеке белгілі бір мәнінде тұрақты ұстай отырып, анықталады. Алынған мәліметтер 2÷5 кестелерде және 1-суретте берілген. Брикет отынының құрамындағы қоспалардың мөлшері үшін әртүрлі мәндерді қабылдау кезіндегі отынның жану жылуының мәндері 2-кестеде берілген.

Кесте 2 – Брикет отынының құрамындағы қоспалардың мөлшері үшін әртүрлі мәндерді қабылдау кезіндегі отынның жану жылуы

Меншікті жану жылуының мөлшері, ккал/кг			Салмақтық үлестегі брикет құрамы, %			Құрамның қосындысы	Ж а н у жылуының мөлшері, Q, ккал
АШПШ	Көмір	К ү р і ш қауызы	АШПШ	Көмір	К ү р і ш қауызы		
10320	5950	3500	0	0,9	0,1	1	5705
10320	5950	3500	0,05	0,8	0,15	1	5801
10320	5950	3500	0,1	0,7	0,2	1	5897
10320	5950	3500	0,15	0,6	0,25	1	5993
10320	5950	3500	0,2	0,5	0,3	1	6089
10320	5950	3500	0,25	0,4	0,35	1	6185
10320	5950	3500	0,3	0,3	0,4	1	6281
10320	5950	3500	0,35	0,2	0,45	1	6377
10320	5950	3500	0,4	0,1	0,5	1	6473
10320	5950	3500	0,45	0	0,55	1	6569

Брикет отыны құрамындағы күріш қауызы тұрақты (0,10% салмақтық үлесте) деп, басқа қоспалардың салмақтық үлесін әртүрлі мәндерде өзгерткен кездегі жану жылуының мәндері 3-кестеде көрсетілген.

Кесте 3 – Күріш қауызының салмақтық үлесі тұрақты болғанда

Меншікті жану жылуының мөлшері, ккал/кг			Салмақтық үлестегі брикет құрамы, %			Құрамның қосындысы	Жану жылуының мөлшері, Q, ккал
АШПШ	Көмір	Күріш қауызы	АШПШ	Көмір	Күріш қауызы		
10320	5950	3500	0	0,9	0,1	1	5705
10320	5950	3500	0,05	0,85	0,1	1	5923,5
10320	5950	3500	0,1	0,8	0,1	1	6142
10320	5950	3500	0,15	0,75	0,1	1	6360,5
10320	5950	3500	0,2	0,7	0,1	1	6579
10320	5950	3500	0,25	0,65	0,1	1	6797,5
10320	5950	3500	0,3	0,6	0,1	1	7016
10320	5950	3500	0,35	0,55	0,1	1	7234,5
10320	5950	3500	0,4	0,5	0,1	1	7453
10320	5950	3500	0,45	0,45	0,1	1	7671,5

Брикет отыны құрамындағы көмір тұрақты (0,40 % салмақтық үлесі) деп, басқа қоспалардың салмақтық үлесін әртүрлі мәндерде өзгерткен кездегі жану жылуының мәндері 4 - кестеде келтірілген.

Кесте 4 – Көмір ұнтағының мөлшерлері тұрақты болғанда

Меншікті жану жылуының мөлшері, ккал/кг			Салмақтық үлестегі брикет құрамы, %			Құрамның қосындысы	Жану жылуының мөлшері, Q, ккал
АШПШ	Көмір	Күріш қауызы	АШПШ	Көмір	Күріш қауызы		
10320	5950	3500	0	0,4	0,6	1	4480
10320	5950	3500	0,05	0,4	0,55	1	4821
10320	5950	3500	0,1	0,4	0,5	1	5162
10320	5950	3500	0,15	0,4	0,45	1	5503
10320	5950	3500	0,2	0,4	0,4	1	5844
10320	5950	3500	0,25	0,4	0,35	1	6185
10320	5950	3500	0,3	0,4	0,3	1	6526
10320	5950	3500	0,35	0,4	0,25	1	6867
10320	5950	3500	0,4	0,4	0,2	1	7208
10320	5950	3500	0,45	0,4	0,15	1	7549

Брикет отынының құрамындағы қоспалардың мөлшерлерін өзгерту арқылы, алынған жану жылуының орташа мәндері 5 - кестеде келтірілген.

Кесте 5 – Брикет отынының орташа есептелген жану жылуы

Меншікті жану жылуы, ккал/кг			Брикет құрамының жану жылуы Q, ккал			Жану жылуының орташа мәні, Q, ккал
АШПШ	Көмір	Күріш қауызы	Қоспаның барлығы өзгергенде	Күріш қауызының мәні тұрақты (10% салмақтық үлесте)	Көмірдің мәні тұрақты (40% салмақтық үлесте)	
10320	5950	3500	5705	5705	4480	5296,7
10320	5950	3500	5801	5923,5	4821	5515,2
10320	5950	3500	5897	6142	5162	5733,7
10320	5950	3500	5993	6360,5	5503	5952,2
10320	5950	3500	6089	6579	5844	6170,7
10320	5950	3500	6185	6797,5	6185	6389,2
10320	5950	3500	6281	7016	6526	6607,7
10320	5950	3500	6377	7234,5	6867	6826,2
10320	5950	3500	6473	7453	7208	7044,7
10320	5950	3500	6569	7671,5	7549	7263,2

Математикалық есептеулер нәтижесінде алынған кестелердегі мәндер арқылы брикет отынының жану жылуының өзгеру қисықтары 1 - суретте бейнеленген.

1-суретте көрсетілгендей, жүргізілген зерттеу жұмыстары бойынша барлық қарастырылған жағдайларда есептелген брикет отынының жану жылуы, орташа алғанда 5296,7 ккал – 7263,2 ккал аралығында өзгерген. Отынның жануы кезіндегі жылу мөлшері, құрамындағы барлық заттарды өзгерту мөлшеріне және өзара сәйкестендірілуі мен желімдесудің технологиялық шарттарына тікелей тәуелді болады. Брикет отынын жасау технологиясы бойынша жүргізілген теориялық есептеулердің нәтижелерінде, АШПШ жасалатын брикеттелген отынның жану жылуының ең аз мәні  $Q_{\min} = 4480$  ккал, ең жоғарғы мүмкін мәні  $Q_{\max} = 7671,5$  ккал екені анықталды.

Сурет 1 – Брикет отыны құрамындағы қоспалардың үлестік мөлшері өзгерген кездегі жану жылуының орташа мәндері

Зерттеу жұмысы Шұбаркөл кен орны көмірінен брикет отынын алу мақсатында АШПШ қалдықтарын байланыстырғыш материал ретінде қолдану мүмкіндігін қарастырды. Бұл қалдықтар  $+25\div 300\text{C}$  қоршаған ортаның температурасында өзінің агрегаттық күйін сақтап қалатын тұтқыр зат. Сол себептен оларды біртекті құрамдағы шихтамен байланыстырғыш ретінде пайдаланған жағдайда  $+120\div 1300\text{C}$  балку температурасына дейін қыздыруымыз қажет.

Зертханалық жағдайда алынған брикет отынын тәжірибелік сынау жұмыстары көрсеткендей, өртеу барысында үлгілердің формасы өзгерген жоқ (кесте 6, сурет 2).

Кесте – 6 Брикет сынақтарының нәтижелері

t, мин	0	5	10	15	20	25	30	35	40
T, °C	0	147	256	487	612	790	563	462	402



Сурет 2 – Алынған брикет отынының жану процесі

### Қорытынды

Жүргізілген зертханалық сынақтардың нәтижелерін растау үшін көмірді брикеттеудің әзірленген шарттарына сынақтар жүргізілді. Шұбаркөл кен орнының көмірін брикеттеу мүмкіндігі анықталды.

АШПШ мөлшерін  $22\div 26\%$ , көмір  $60\div 70\%$ , ал күріш қауызын  $5\div 10\%$  аралығында қосу арқылы отынның тиімді құрамы талаптарға сәйкес келетіні анықталды.

Брикет отынының жылу бөлгіштік қасиеттерінің шектік мәндері мен суды сіңіру қасиеттері анықталды. Отынды жаққаннан кейін бөлінетін күлдің мөлшері, отын құрамындағы көмірдің күлдену мөлшеріне және күріш қауызының салмақтық үлесіне байланысты екені көрсетілді.

Сонымен бірге Құмкөл кен орнынан алынған АШПШ құрамында күкірттің пайыздық мөлшері өте аз шамада ( $0,1\div 0,3\%$ ), сол себептен отынның сапалық құрамына әсер етпейді.

Брикет отынының жылу бөлгіштік қасиетін анықтау үшін алынған үлгіні қазандық пеште жағу жұмыстары жүргізілді. Нәтижесінде отын жақсы тұтанып, оттық жалыны толық болып, отынның жану ұзақтығы  $35\div 40$  минут құрады. Сонымен бірге отын жану кезінде жұмсарғаны байқалды, дегенмен өзінің формасын жақсы сақтап қалды.

Жүргізілген зерттеу жұмыстарының нәтижесінде АШПШ брикет отынының құрамына байланыстырғыш қоспа ретінде пайдалану жоғары сұранысқа ие болатынын көрсетті.

### ПАЙДАЛАНЫЛҒАН ДЕРЕКТЕР ТІЗІМІ

1 Bisenov, K.A., Zhumagulov, T.Zh., Tanzharikov, P.A., Yerzhanova, A.T., Yerimbetov, K.A. Technology of preparation of briquetted fuel based on production waste. *News of the Academy of Sciences of the Republic of Kazakhstan, Series of Geology and Technical Sciences*, 2(464), March-April 2024. p.48–64. – [Electronic resource]. <https://doi.org/10.32014/2024.2518-170X.393>.

2 Bisenov, K.A., Tanzharikov, P.A., Sarabekova, U. (2021). The substantiation of the influence of asphalt resin paraffin oil residue on the asphalt concrete technology [Electronic resource]. IOP Conf. Series: /Materials Science and Engineering. –DOI:10.1088/1757 899X/1030/1/012113. P.1174–1182.

3 Ismailova, A.A., Kanaev, A.T., Zhalgassuly, N., Asjan, M., Mamonov, A.G. (2018). Technology of saline land reclamation by brown coal products [Electronic resource]. *News of the Academy of Sciences of the Republic of Kazakhstan, Series of Geology and Technical Sciences*, (6), 120–128.

4 Zhumagulov, T.Zh., Yeleuova, E.S., Abzhalelov, B.B., Demin, D.V. (2021, December). Identifying The Quantity of Combustion Heat when Briquetting Oil Waste Process. In IOP Conference Series: Earth and Environmental Science (Vol. 931, No. 1, p. 012001). – [Electronic resource]. IOP Publishing. DOI 10.1088/1755-1315/931/1/012001.

5 Елишев А. Т. Брикетирование каменного угля с масляным связующим [Текст]. – М.: Недра. – 1989. – 299 с.

6 Бисенов К. А., Жалгасулы Н., Танжарыков П. А., Когут А. В., Исмаилова А. А. Технология переработки отходов предприятий Казахстана

: монография [Текст]. – Кызылорда: «Тумар», 2021. – 344 с. ISBN: 978-601-229-772-0.

7 **Нифонтеев Ю.А.** Научные основы создания ресурсосберегающих технологий с использованием отходов производства и переработки угля. Печорский бассейн: автореферат [Текст]. Доктор технических наук в Санкт-Петербургской государственной горной академии им. Г.В. Плеханова. – СПб. – 2000. – 40 с.

8 Патент RU №2486232. Способ получения топливных брикетов [электронный ресурс]. (2013). / Штырей В.В., Прошкин А.В., Нагибин Г.Е. и др. Опубликовано 27.06.2013.

9 **Tanzharykov P.A., Sarabekova U.J.** (2012). Assessment of the economic efficiency of the use of oil waste disposal technology/Actual Problems Economics. pp.251–259. – [Electronic resource].

10 **Жумагулов Т.Ж.** Технология использования нефтяных отходов и исследования их экологической эффективности (на примере месторождения Кумколь) [Текст] : дис. ... канд. техн. наук: 25.00.36: защищена 12.11.10: / Жумагулов Темирбек Жамедович. – Алматы., 2010. – 122 с. – Библиогр.: с. 107–115.

## REFERENCES

1 **Bisenov, K.A., Zhumagulov, T.Zh., Tanzharikov, P.A., Yerzhanova, A.T., Yerimbetov, K.A.** Technology of preparation of briquetted fuel based on production waste. [News of the Academy of Sciences of the Republic of Kazakhstan, Series of Geology and Technical Sciences](https://doi.org/10.32014/2024.2518-170X.393), 2(464), March-April 2024. p.48–64. – [Electronic resource]. <https://doi.org/10.32014/2024.2518-170X.393>.

2 **Bisenov, K.A., Tanzharikov, P.A., Sarabekova, U.** (2021). The substantiation of the influence of asphalt resin paraffin oil residue on the asphalt concrete technology [Electronic resource]. IOP Conf. Series: /Materials Science and Engineering. –DOI:10.1088/1757 899X/1030/1/012113. P.1174–1182.

3 **Ismailova, A.A., Kanaev, A.T., Zhalgassuly, N., Asjan, M., Mamonov, A.G.** (2018). Technology of saline land reclamation by brown coal products [Electronic resource]. [News of the Academy of Sciences of the Republic of Kazakhstan, Series of Geology and Technical Sciences](https://doi.org/10.32014/2018.2518-170X.393), (6), 120–128.

4 **Zhumagulov, T.Zh., Yeleuova, E.S., Abzhalelov, B.B., Demin, D.V.** (2021, December). Identifying The Quantity of Combustion Heat when Briquetting Oil Waste Process. In IOP Conference Series: Earth and Environmental Science (Vol. 931, No. 1, p. 012001). – [Electronic resource]. IOP Publishing. DOI 10.1088/1755-1315/931/1/012001.

5 **Elishevich A.T.** Briketirovanie kamennogo uglya s maslyanym svyazuyushchim.[ Briquetting of coal with an oil binder] [Text] – M.: Nedra. – 1989. – 299 s. [in Russian]

6 **Bisenov K.A., Zhalgasuly N., Tanzharykov P.A., Kogut A.V., Ismailova A.A.** Tekhnologiya pererabotki othodov predpriyatij Kazahstana [Waste processing technology of Kazakhstan enterprises : monograph] [Text]. – Kyzylorda: «Tumar», 2021. – 344 s. ISBN: 978-601-229-772-0. [in Russian]

7 **Nifonteev Yu.A.** Nauchnye osnovy sozdaniya resursosberegayushchih tekhnologij s ispol'zovaniem othodov proizvodstva i pererabotki uglya. Pechorskij bassejn [The scientific basis for the creation of resource-saving technologies using waste from the production and processing of coal. Pechora Basin]: avtoreferat. Doktor tekhnicheskikh nauk v Sankt-Peterburgskoj gosudarstvennoj gornoj akademii im. G.V. Plekhanova. [Text] – SPb. – 2000. – 40 s. [in Russian]

8 ПатентRU №2486232. Способ получения топливных брикетов [The method of obtaining fuel briquettes]. (2013). / SHtyrejV.V., ProshkinA.V., NagibinG.E. idr. Opublikovano 27.06.2013. [in Russian]

9 **Tanzharykov P.A., Sarabekova U.J.** (2012). Assessment of the economic efficiency of the use of oil waste disposal technology [Electronic resource] / Actual Problems Economics. pp.251–259.

10 **Zhumagulov T.Zh.** Tekhnologiya ispol'zovaniya neftyanyh othodov i issledovaniya ih ekologicheskoy effektivnosti (na primere mestorozhdeniya Kumkol') [Technology for the use of oil waste and research on its environmental effectiveness (using the example of the Kumkol deposit)] [Text]: dis. ... kand. tekhn. nauk: 25.00.36: zashchishchena 12.11.10: / Zhumagulov Temirbek Zhamedovich. – Almaty., 2010. – 122 s. – Bibliogr.: s. 107–115.

26.12.24 ж. баспаға түсті.

23.01.25 ж. түзетулерімен түсті.

10.03.25 ж. басып шығаруға қабылданды.

\*Т. Ж. Жумагулов<sup>1</sup>, П. А. Танжариков<sup>2</sup>, Э. Ш. Елеуова<sup>3</sup>,  
А. М. Жабагиев<sup>4</sup>, Е. А. Назаров<sup>5</sup>.

<sup>1,2,3,4,5</sup>Кызылординский университет имени Коркыт Ата,

Республика Казахстан, г. Кызылорда

Поступило в редакцию 26.12.24

Поступило с исправлениями 23.01.25

Принято в печать 10.03.25

### **ЭФФЕКТИВНЫЕ ТЕХНОЛОГИИ БРИКЕТИРОВАНИЯ: ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ОТХОДОВ ПРОИЗВОДСТВА В ЭНЕРГЕТИКЕ**

*Аннотация. В этой статье рассматривается технология эффективного использования парафиновых отходов, выделяемых на нефтяных месторождениях, угольных отходов и твердых отходов, образующихся при производстве риса в сельскохозяйственной отрасли, в качестве вторичных сырьевых ресурсов. С научным анализом воздействия и последствий промышленных отходов на окружающую среду представлены проекты их использования в различных производственных отраслях.*

*В ходе проведения исследовательских работ и практических испытаний выявлены экологические проблемы региона и пути получения брикетированного топлива. Проанализированы новые научно обоснованные результаты проведенных исследовательских работ и методики исследований способов использования образовавшихся в производстве видов отходов. В частности, были проведены физико-химические анализы парафиновых отходов, образующихся на нефтяных месторождениях, расположенных в Южно-Тургайской низменности, порошкообразного остатка угля с месторождения Шубарколь, а также внешней шелухи рисовой культуры, возделываемой на территории Кызылординской области. По полученным данным, посредством математических расчетов, в ходе опытной работы проводились неоднократные испытания на прочность каждой смеси, ее влажность, температура и уплотнение в специально подготовленных стандартных емкостях при различных давлениях.*

*Также были проведены расчеты теплоты сгорания с целью энергетической оценки нового вида брикетированного топлива. Определены концентрации каждой из смесей, входящих в состав брикетного топлива, с изменением их весовых долей с возможным интервалом. Все вычислительные работы проводились с помощью*

*компьютерных программ. В результате проведенных научных исследований были предложены технологии для решения экологических проблем страны и получения новых видов топлива в энергетическом отношении.*

*Ключевые слова: нефть, уголь, отходы производства, технология, брикет, АСПО, рисовая шелуха.*

T. Zh. Zhumagulov<sup>1</sup>, P.A. Tanzharikov<sup>2</sup>,

E.Sh. Eleuova<sup>3</sup>, A. M. Zhabagiev<sup>4</sup>, E.A. Nazarov<sup>5</sup>

<sup>1,2,3,4,5</sup>Korkyt Ata Kyzylorda University, Republic of Kazakhstan, Kyzylorda

Received 26.12.24

Received in revised form 23.01.25

Accepted for publication 10.03.25

### **EFFECTIVE BRIQUETTING TECHNOLOGIES: THE USE OF INDUSTRIAL WASTE IN THE ENERGY SECTOR**

*This article discusses the technology of effective use of paraffin waste released from oil fields, coal waste and solid waste generated during rice production in the agricultural sector as secondary raw materials. With a scientific analysis of the impact and consequences of industrial waste on the environment, projects for their use in various industrial sectors are presented.*

*In the course of research and practical tests, environmental problems of the region and ways to obtain briquetted fuel were identified. The new scientifically based results of the conducted research and methods of research on the ways of using the types of waste generated in production are analyzed. In particular, physico-chemical analyses of paraffin waste generated at oil fields located in the South Turgai lowland, powdered coal residue from the Shubarkol deposit, as well as the outer husk of rice crops cultivated in the Kyzylorda region were carried out. According to the data obtained, through mathematical calculations, during the pilot work, repeated tests were carried out on the strength of each mixture, its humidity, temperature and seal in specially prepared standard containers at various pressures.*

*Calculations of the heat of combustion were also carried out for the purpose of energy assessment of a new type of briquetted fuel. The concentrations of each of the mixtures included in the briquette fuel were determined, with a change in their weight fractions with a possible interval.*



*All computing work was carried out using computer programs. As a result of the conducted scientific research, technologies have been proposed to solve the country's environmental problems and obtain new types of fuels in energy terms.*

*Keywords: oil, coal, production waste, technologies, briquettes, ARPD, rice husks.*

МРНТИ 45.43.31

<https://doi.org/>

**\*С. В. Ибрагимова<sup>1</sup>, Н. С. Неберекутина<sup>2</sup>,  
Г. А. Сарсенбаева<sup>3</sup>**

<sup>1,3</sup>Ахмет Байтұрсынұлы атындағы Қостанай Өңірлік Университеті  
А. Байтұрсынұлы, Қазақстан Республикасы, Қостанай қ.

<sup>2</sup>МАКБМ Челябині облысының политехникалық колледжі,  
Ресей Федерациясы, Магнитогорск қ.

<sup>1</sup>ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-2798-9149>

<sup>2</sup>ORCID: <https://orcid.org/0009-0004-8098-9820>

<sup>3</sup>ORCID: <https://orcid.org/0009-0002-2571-4176>

\*e-mail: [ibragimovasvetlana75@gmail.com](mailto:ibragimovasvetlana75@gmail.com)

## **ҚҰРАМЫНДА КӨМІРТЕГІ БАР МАТЕРИАЛДАРДЫҢ ЭЛЕКТРОФИЗИКАЛЫҚ ҚАСИЕТТЕРІНІҢ БЕЛСЕНДІРІЛГЕН КӨМІРДІ АЛУ ПРОЦЕСІНІҢ ПАРАМЕТРЛЕРІНЕ ӘСЕРІ**

*Жұмыста температуралық режимнің құрамында көміртегі бар материалдардың электрофизикалық қасиеттеріне кедергімен тікелей және жанама қыздыру жағдайында әсері зерттеледі. Алынған нәтижелер өсімдік өндірісінің қалдықтарынан белсендірілген көмірді электротехнологиялық тәсілмен алу технологиясын әзірлеуде қолданылады. Шикізаттың электрофизикалық қасиеттерін зерттеу белсендірілген көмірдің ішкі құрылымының қалыптасу кезеңдерін анықтауға, материалдың қызып кетуді немесе жеткілікті деңгейде қыздырылғанын болдырмауына жол береді, бұл бөлшектердің деформациясына және сорбенттің күтілетін қасиеттерінің өзгеруіне әкелуі мүмкін. Жұмыста белсендірілген көмір өндірудің қабылданған технологиясымен реттелетін температура диапазонында графиттің әртүрлі түрлерінің үлгілерінің меншікті электр кедергісінің тәуелділігі эксперименталды түрде анықталды. Сипаттама экспоненциалды түрде төмендейтіні анықталды. Алайда, шамамен 400 °С температураға жеткенде, әр түрлі көмірдің электрофизикалық сипаттамалары бір-біріне жақындайды, бұл олардың бірдей қасиеттерге ие болуын көрсетеді. Жұмыста ұсынылған зерттеулер технологиялық процестің нақты жағдайлары*

*үшін өте маңызды, мұнда қайта өңделетін материал көлемінің ішіндегі температураны тікелей өлшеу техникалық тұрғыдан қиын. Сондықтан, жұмыста ұсынылған температураны өлшеудің вольтты индикациясына негізделген байланыссыз әдісі перспективалы болып саналады және технологиялық жабдықты өзгертуге байланысты күрделі шешімдерді қажет етпейді.*

*Кілтті сөздер: белсендірілген көмір, сорбент, электротехнологиялық әдіс, өсімдік шикізаты, қыздыру, электрофизикалық қасиеттері, температураның вольтты индикаторы.*

### **Кіріспе**

Белсендірілген көмір – құрамында көміртегі бар қатты материалдан алынған ұнтақ немесе түйіршіктер түріндегі кеуекті материал – ағаш, жаңғақ қабығы, кокос жаңғағы, синтетикалық шайырлы қант 600–950°C температурада, оттегі болмаған кезде сұйық және газ тәрізді ортадан әртүрлі элементтерді сорып алуға қабілетті.

Белсендірілген көмірдің кеуектерінің мөлшері кең ауқымда өзгереді, шектері 106 еседен астам өзгереді – көрінетін жарықтар мен жарықтардан молекулалық деңгейде әртүрлі саңылаулар мен бос орындарға дейін. Бұл көмірді «белсендірілген» ететін және оның сорбциялық қасиеттерін анықтайтын кеуектіліктің жоғары деңгейі, ол суды, ауаны тазарту процестерінде, химиялық процестерде, азық – түлік, мұнай – газ өндіру және өңдеу өнеркәсібінде қолданылады.

Кеуектердің құрылымына оларды алу үшін бастапқы материалдар шешуші әсер етеді. Мысалы, кокос қабығынан алынған белсендірілген көмірлер микропоралардың үлкен үлесімен сипатталады, көмірге негізделген – мезопоралардың басым болуы байқалады. Макропоралардың үлкен үлесі белсендірілген ағаш негізіндегі көмірге тән. Құрылымында кеуектердің барлық түрлерін біріктіретін белсендірілген көмірді алу әмбебап органикалық сорбентті, қолданудың кең спектрін құру мәселесін шешуге әкеледі.

Зерттеулер [1, 584-б.], құрылымы әртүрлі конфигурациялар мен өлшемдегі тері тесігін біріктіретін белсендірілген көмір үшін материал ретінде өсімдік шикізатын, соның ішінде дәнді дақылдардың қалдықтарын пайдалану перспективасын көрсетті [2, 988-б.]. Авторлардың еңбектерінде [3, 30-б.] жыл сайын Солтүстік және Орталық Қазақстанның егістіктерінде мол пайда болатын бидай, арпа, жүгері және рапс дәндерін саңырауқұлақ дерттерімен жұқтырған пайдалану ұсынылады. Өсімдік қалдықтарын белсендірілген көмірге қайта өңдеу тәсілі және сорбциялық процестерде пайдаланғаннан кейін оның ықтимал регенерациясы ретінде электр

энергиясын қолдану мүмкіндігі қарастырылуда [4, 294-б.]. Жаңа технологияның негізінде шикізатты тікелей резистивті жылыту жатыр [5, 294-б.]. Белсендірілген көмірді алудың жаңа әдісін әзірлеудің алғашарттары қайнаған қабаты бар пештерде көміртегі бар шикізатты қыздырудың қолданыстағы технологияларының, шахталық, көп отты, барабанды әр түрлі жылу тасымалдағыштарды – жану газдарын, буды және түзілетін газдарды пайдалана отырып анықталған кемшіліктері болып табылады [6, 213-б.]. Бұл әдістер шикізат пен дайын өнімнің жоғары шығынымен, капитал сыйымдылығымен, материал сыйымдылығымен, экология тұрғысынан қауіпті болуымен, бір партия ішіндегі материалдың қасиеттерін басқарудың қиындығымен және біртектілік еместігімен сипатталады.

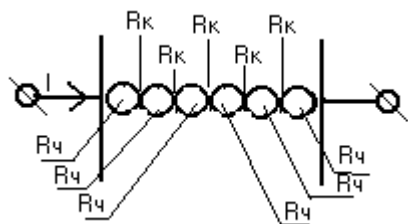
Белсендірілген көмірді алудың электротехнологиялық әдісін әзірлеу үшін оның электрофизикалық сипаттамаларын зерттеу жүргізілді. Олар жеткілікті түрде белгілі емес, өйткені ол өндіріс кезеңінде де, пайдалану кезеңінде де қолданылмайды, сондықтан көмірдің қасиеттері бойынша стандарттарға кірмейді [7, 2-3-бб.]. Көмірдің электрофизикалық қасиеттерін білу процестің техникалық параметрлерін анықтау үшін қажет, олардың өзгеруі өсімдік шикізатын түпкілікті өнімге айналдыру кезеңдерімен байланысты.

### **Материалдар мен әдістері.**

Қыздыру процесінде өзгертін қасиеттері бар материалдар үшін ең тиімдісі, біздің ойымызша, материалды электр тізбегіне қосу арқылы Джоуль – Ленц заңы бойынша электрлік жылыту жалпы қыздырылатын көлемге «бастапқы электр өткізгіш қабатын» енгізу арқылы қарастырылуы керек. Қыздыру процесінде өзгертін физикалық қасиеттері бар материалды резистивті жылытудың ұқсас электротехнологиялық процесі жұмыстарда сипатталған [8, 68-б.].

Процестің өсімдік дәнді қалдықтарынан белсендірілген көмірді өндіру технологиясының ерекшелігі – көмірдің әрбір түйіршігін қыздыру оның ішінен бүкіл көлемде өндіріледі. Бұл сорбаттың тері тесігін шығатын су буымен және ыдырайтын көмірсутектермен тазартуға және көмірдің сорбциялық қабілетін арттыруға көмектеседі.

Бөлшектер қызған кезде олардан шыққан бу нүктелік контактілерді бұзады (1 сурет) және қатардың тізбегі үзіледі.



Сурет 1 – Дисперсті материалдың массасындағы электр өткізгіш арнаның моделі; электр тізбегі екі электрод арасында көмір бөлшектері арқылы түзіледі.

Электр өткізгіштік механизмін қалпына келтіру екі жолмен мүмкін:

1. Көршілес бөлшектер мен бу қабатының бұзылуы арасындағы үлкен ұзындықтағы арналар арқылы ток өткізу үшін кернеудің жоғарылауы.

2. Көмірдің массасын шайқау немесе бу немесе сұйықтық пленкасын бұзу үшін мерзімді тербелістерді қолдану арқылы. Процестің электрлік параметрлерін қалпына келтіру үшін дірілді  $150^{\circ}\text{C}$  температураға дейін қайталау керек. Әрі қарай,  $250 - 280^{\circ}\text{C}$  температурада массаны шайқау қажет, өйткені осы кезеңде әртүрлі газдардың бөлінуімен бірге органикалық заттардың ыдырауы жүреді. Газдарды шығару процесі  $400 - 450^{\circ}\text{C}$  температураға дейін жалғасады, содан кейін қыздыру режимі тұрақты болады, содан кейін бөлшектердің материалы температураға дейін «біртіндеп» қызады  $600 - 850 - 1000^{\circ}\text{C}$  және мүмкін жоғары.

Соңғы кезең Н – көмірді алу процесімен, шикізаттың белгілі бір уақыт ішінде «активтендіру температурасында» ұсталуымен реттеледі, оның барысында көмірлер олардың белсенді қасиеттерін алады [9, 1387-б.].

Көмірдің массасы арқылы өтетін токтың шамасы бір мезгілде бар электр өткізгіштік арналарының санымен, ал электродтардағы кернеу температураның жоғарылауымен электр тізбектерінің өзгеретін кедергісімен анықталады.

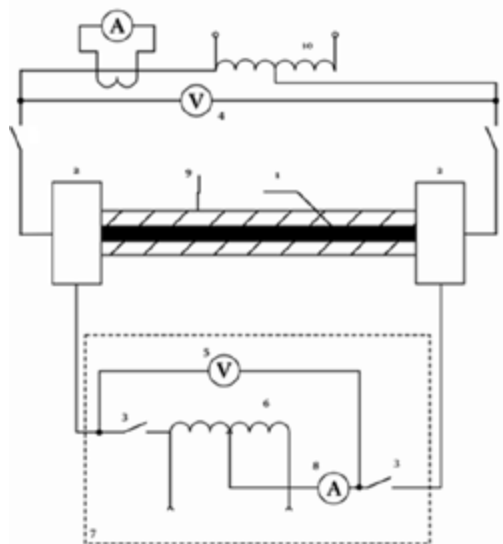
Ағын тогының шамасын шектеу жағдайында реактор электродтарына берілетін кернеу технологиялық процестің әртүрлі кезеңдерінде реттеледі. Сондықтан жылу процесінде қайта өңделетін материалдың электрофизикалық қасиеттерінің өзгеру сипатын және олардың әсер ететін шамалардың шамасына әсерін түсіну белсендірілген көмірдің ішкі құрылымын қалыптастырудың анықтаушы факторы болып табылады [10, 2159-б.].

Жаңа технологияны сәтті енгізу өңделетін шикізатты қыздыру процесінің әр сатысында температуралық режимді қатаң сақтай отырып мүмкін болады. Қыздыру жылдамдығы қыздырылған көлемнің өткізгіштігіне

тікелей байланысты, сондықтан өсімдік қалдықтарын белсендірілген көмірге айналдырудың әр фазасындағы оның мәнін білу маңызды. Белсендірілген көмірдің химиялық формуласы тұрақты емес және бастапқы шикізат пен активтендіру әдістеріне тәуелді және сутегі (H), оттегі (O), азот (N), күкірт (S) сияқты элементтерді қамтуы мүмкін. Алайда, белсендірілген көмір өндірісіндегі технологиялық процестің сипаты оның негізгі компоненті – көміртектің (C) қасиеттеріне байланысты [11, 1194-б.]. Сондықтан, зерттеу бірдей құрамы бар материалды – графит шыбықтарының әртүрлі маркаларын үлгі ретінде пайдаланған кезде үлкен ықтималдықпен сенімді болады.

Алынған нәтижелер қыздыру процесінің энергия тиімділігін арттыру, электр және жылу энергиясы мен шикізаттың шығынын азайту және пештің температуралық режимін реттеу мәселесінде шешуші мәнге ие. Зерттеу материалдың қызып кетуіне немесе қызып кетуіне жол бермейді, бұл деформацияға, күтілетін қасиеттердің өзгеруіне және өнімнің сапасының төмендеуіне әкелуі мүмкін.

Эксперимент материалы: дисперсті көмірдің сипаттамаларын анықтау бойынша тәжірибелердегі электродтар арасындағы қашықтыққа сәйкес ұзындықтағы көмір бөлшектерінен түзілген электр өткізгіштік арнасының көлденең қимасы бойынша диаметрі 2,3 мм болатын қоршаған кеңістіктен жылу оқшауланған графит өзектері. Үлгі 2 қысқыштарға орнатылады, олардың біреуі қозғалыссыз, ал екіншісі қыздырылған кезде өзектердің ұзындығының өзгеруіне сәйкес қозғалу мүмкіндігіне ие (1 сурет). Штанганың жылу күйі оның энтальпиясы бойынша бағаланады,  $700^{\circ}\text{C}$ -дан жоғары температураны өлшеу үшін квази-нақты пирометр қолданылды (Quasi-Real-Time Pyrometer) A250+.



1 суреті – Электрлік қыздыру кезінде монолитті көмірдің қасиеттерін зерттеу схемасы: 1 – графит өзегі, 2 – жылытқыштың қуат тізбегінің түйреуіштері, 3 – өлшеу трансформаторын қосу және өшіру кілті,

4 – қыздыру тізбегінің жұмыс кернеуінің вольтметрі, 5 – сызықтық потенциал градиентінің сенсоры, 6 – өлшеу трансформаторы, 7 – көмір температурасының электр индикаторы, 8 – «эталонды» тогының шамасын бақылау амперметрі, 9 – графит өзегінің жылу оқшаулауы, 10 – жылыту автотрансформаторы.

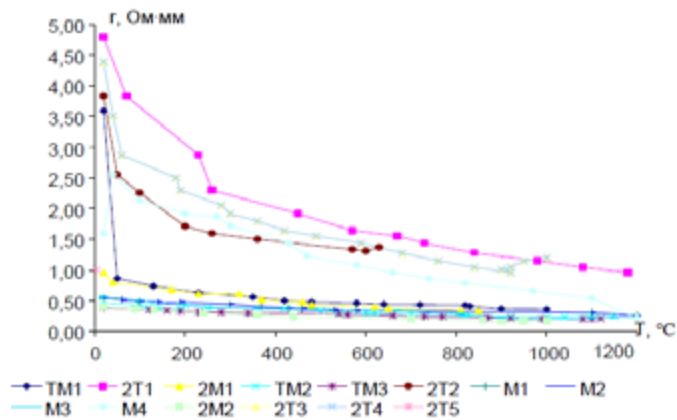
Қалыпты жағдайдағы және қоршаған орта температурасына тең температурадағы сыналатын үлгілердің меншікті электр кедергісі 1 кестеде келтірілген.

Кесте – эксперименттің графит шыбықтарының меншікті кедергісінің мәні.

№ кп	Өзек маркасы.	$\rho$ , Ом·мм.
1	2Т	2,31 – 4,79
2	Т	0,21 – 0,89
3	ТМ	0,15 – 0,46
4	М	0,34 – 0,56
5	2М	0,19 – 0,96

### Нәтижелер және талқылау

Эксперимент көрсеткендей, қыздырылған кезде  $1200^{\circ}\text{C}$  – ға дейінгі температуралық диапазондағы монолитті графиттің меншікті электрлік кедергісі экспоненциалды түрде төмендейді (2 сурет). Қалыпты жағдайда меншікті кедергінің бастапқы мәні  $3,6 - 4,79$  Ом·мм (зерттелетін үлгінің маркасына байланысты)  $0,25$  Ом·мм шамасына дейін төмендейді.

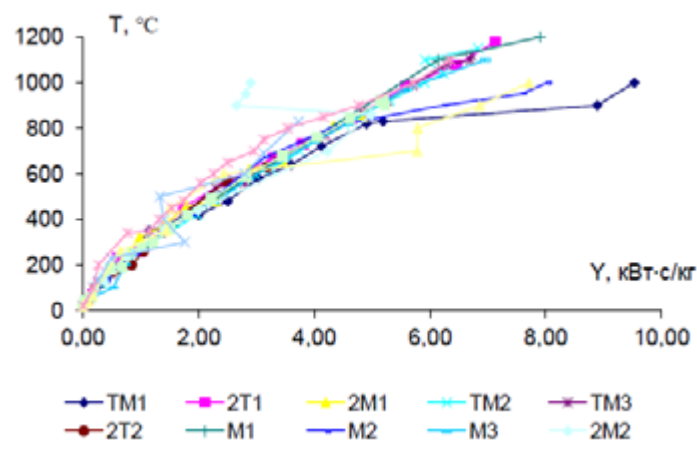


Сурет 2– Температура көтерілген кезде монолитті графиттің меншікті электр кедергісінің өзгеруі

Жылу оқшаулау болған кезде өзектің энергетикалық күйі ток ағымы кезінде алынған энтальпияға сәйкес қабылданады. Сондай-ақ, көміртектің меншікті кедергісі оның энтальпиясы немесе энергия мөлшері жоғарылаған кезде төмендейтіні анықталды, бұл температураның жоғарылауымен бірге жүреді және температура режимінің тұрақтануына кіріс кернеуінің өзгеруі арқылы қол жеткізуге болады (3 сурет).

Шамамен  $400^{\circ}\text{C}$  температураға жеткенде, әр түрлі құрамдағы көмірдің электрофизикалық сипаттамалары бір – біріне жақындайды, бұл олардың  $1200^{\circ}\text{C}$  температураға дейін сақталатын бірдей қасиеттерге ие екендігін көрсетеді.

Алынған тәуелділіктер технологиялық процестің нақты жағдайлары үшін өте маңызды, мұнда қайта өңделетін материал көлеміндегі температураны тікелей өлшеу техникалық жағынан қиын. Бұл жағдайда белгілі бір уақыт аралығындағы энтальпия зат температурасының орташа мәнін көрсетеді.



Суреті 3– Графит өзегінің температурасының энтальпияға тәуелділігі.

Заттың сызықтық потенциал градиенті  $E$  температураның вольтты  $VIT = f(T)$  индикаторы (ВИТ) ретінде де қолданыла алады. Жұмыс тогында ол тәуелділігінің төменгі қатарының қисықтарын көрсететін температураға сезімтал емес (4 сурет). Дәлдікті арттыру үшін оның мәнін «эталонды» деп аталатын белгілі бір токқа жатқызу керек. «Эталонды» тогының максатты шамасын «эталонды» қуаты шегінде белгілі бір материал үшін эксперименталды түрде анықтауға болады:  $P_{mes} = U_{mes} \cdot I_{mes}$ , көлемі бойынша потенциалдың сызықтық градиентін өлшеу кезінде қыздырылған дене көлемінің жылу шығынына сәйкес келеді.

Сондықтан,

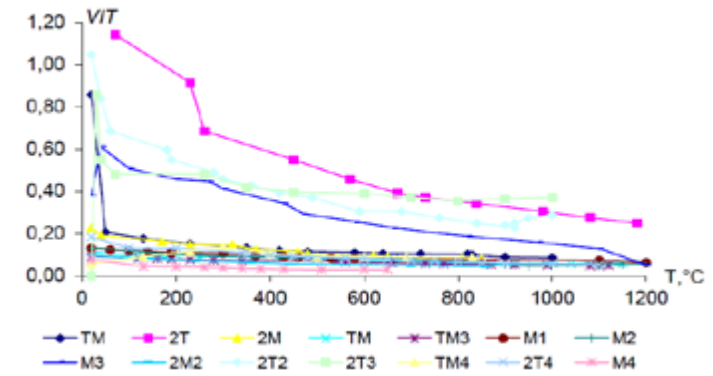
$$E_{mes} = \frac{U_{mes}}{L_{ec}} \equiv T, \quad (2)$$

мұнда  $U_{mes}$  – «эталонды» кернеу, В;  $L_{mes}$  – электр өткізгіш арнаның ұзындығы.

Жылытудың бастапқы кезеңінде «эталонды» тогы,  $j_{mes}$ , ара қатынасынан орнатылуы мүмкін:

$$I_{mes} = S_{el} \cdot j_{mes}. \quad (3)$$

мұнда  $j_{mes}$  – «эталонды» тогының тығыздығы, А/мм<sup>2</sup>; көлденең қиманың ауданына байланысты мыналар шегінде ұсынылады  $j_{mes}$ , А/мм<sup>2</sup>;  $S_{mes}$  – электр өткізгіш каналдың көлденең қимасының ауданы, мм<sup>2</sup>.

Суреті – 4  $VIT = f(T)$ .

Электр тогымен жылытылатын ортаның температурасының индикаторы ретінде потенциалдың сызықтық градиентін өлшеу технологиясы келесідей.

$t = 5 \div 7$  с шегінде өлшеу ұзақтығы кезінде  $j_{mes}$  өтуін қамтамасыз ететін потенциалдың сызықтық градиентінің пайда болатын шамасы өрнегіне  $E_0 = \frac{U_{el}}{L_{el}}$  сәйкес анықталады және қалыпты жағдайда өзектің энтальпиясы мен температурасына сәйкес келеді.

Материалды ток пен кернеудің жұмыс параметрлерімен ( $I_w, U_w$ ) (қыздыру кезінде «эталонды» режиміне өту  $I_w, U_w$ ) мәнін  $I_{mes} = (0,01 \div 0,1)I_w$  мәніне дейін лезде төмендету арқылы жүзеге асырылады. Бұл токқа көміртектің жылу күйінің индикаторы болып табылатын потенциалының сызықтық градиентінің белгіленген мәні (2) қатынасымен сипатталады.

#### Қорытынды

Өлшенген температурамен салыстырған кезде потенциалдың «эталонды» сызықтық градиенті қыздырылған материалдың температурасын көрсетеді. Қыздырылған көлемнің температурасын жанама түрде анықтаудың бұл әдісі жабдықтың қыздырылған материалмен тікелей байланысын қажет етпестен оның деңгейін анықтауға мүмкіндік береді. Материалдың дисперсиясы жағдайында және нәтижесінде қыздырылған көлемдегі температура өрістерінің біркелкі условияхстігі нәтижесінде алынған өнімді өңдеудің біртектілік дәрежесін бақылау қажет болады. Бұл мәселенің шешімі реакция

камерасының әртүрлі деңгейлерінде өлшеу құралдарын (термопараларды) орнату болуы мүмкін, алайда бұл шешімді технологиялық регламентке сәйкес қыздырылатын көлемге діріл әсерін араластыру және қолдану қажеттілігіне байланысты орындау техникалық жағынан қиын. Сондықтан, қыздырылған материалдың электрофизикалық қасиеттерін талдау негізінде температураны өлшеудің ұсынылған әдісін қолдану қолайлы және жабдықты өзгертуге байланысты күрделі шешімдерді қажет етпейді.

#### ПАЙДАЛАНЫЛҒАН ДЕРЕКТЕР ТІЗІМІ

1 **Paraskeva, P., Kalderis, D., & Diamadopoulos, E.** (2008). Production of activated carbon from agricultural by-products. [Мәтін] *Journal of Chemical Technology & Biotechnology*, 83(5), 581–592. doi:10.1002/jctb.1847

2 **Arjmand, C., Kaghazchi, T., Latifi, S. M., & Soleimani, M.** (2006). Chemical Production of Activated Carbon from Nutshells and Date Stones. [Мәтін] *Chemical Engineering & Technology*, 29(8), 986–991. doi:10.1002/ceat.200500325

3 **Машкина С.В.** Электрический нагрев неэлектропроводного дисперсного сырья при производстве активированного угля : автореф. дис. ... канд. техн. наук по специальности 05.09.10 - Электротехнология. [Мәтін]: - Алматы, 2009.

4 **Марковский В.П., Жанкуанышев М.К., Утегулов А.П., Ибрагимова С.В., Кошкин И.В., Сарсенбаева Г.А.** Белсендірілген көмір өндіру жөніндегі электр технологиялық реактордың өнімділігін анықтауға. [Мәтін] *Вестник ПГУ*, №1, 2020, С.292-301.

5 **Болотов А., Машкина С.** Оборудование и технологии производства активированных углей. [Мәтін] *Научно технический сборник «Новости науки Казахстана»*. 2007 (4). С.59-63. ISSN:1560-5655

6 **Ibragimova, S., Bolotov, A., Takenov, S.** (2017). Prospects of using vegetative raw material in modern technology of activated carbon production. [Мәтін] *Многопрофильный научный журнал «3i –intellect, Idea, Innovation - интеллект, идея, инновация» КГУ имени А.Байтурсынова*, 2017 (4), 210-218. ISSN 2226-6070

7 ГОСТ 33614-2015 Угли активированные. Номенклатура показателей качества [Мәтін]

8 **Болотов А.В., Машкина С.В.** Свойства активированного угля, полученного в электрическом реакторе [Мәтін]// *Вестник национальной инженерной академии Республики Казахстан.*–2009.- №1.- С.66-71.

9 **Ibragimova, S., Kushnir, V., Koshkin, I.** Electric Heating of Non-conductive Dispersed Raw Materials in Activated Carbon Production [Мәтін]/

In: Radionov A.A., Gasiyarov V.R. (eds) *Proceedings of the 6th International Conference on Industrial Engineering. ICIE 2021. Lecture Notes in Mechanical Engineering*. Springer, Cham., p.1384-1392. doi:10.1007/978-3-030-54817-9\_161

10 **Sun, J., Wu, G., & Wang, Q.** (2005). The effects of carbonization temperature on the properties and structure of PAN-based activated carbon hollow fiber. [Мәтін] *Journal of Applied Polymer Science*, 97(5), 2155–2160. doi:10.1002/app.21955

11 **Daley, M. A., Tandon, D., Economy, J., & Hippo, E. J.** (1996). Elucidating the porous structure of activated carbon fibers using direct and indirect methods. [Мәтін] *Carbon*, 34(10), 1191–1200. doi:10.1016/0008-6223(96)00065-6

#### REFERENCES

1 **Paraskeva, P., Kalderis, D., & Diamadopoulos, E.** (2008). Production of activated carbon from agricultural by-products. [Text] *Journal of Chemical Technology & Biotechnology*, 83(5), p. 581–592. doi:10.1002/jctb.1847

2 **Arjmand, C., Kaghazchi, T., Latifi, S. M., & Soleimani, M.** (2006). Chemical Production of Activated Carbon from Nutshells and Date Stones. [Text] *Chemical Engineering & Technology*, 29(8), p. 986–991. doi:10.1002/ceat.200500325

3 **Mashkina S.V.** Elektricheskiy nagrev neelektroprovodnogo dispersnogo syr'ya pri proizvodstve aktivirovannogo uglya : avtoref. dis. ... kand. tekhn. nauk po special'nosti 05.09.10 - Elektrotekhnologia [Electric heating of non-electrically conductive dispersed raw materials in the production of activated carbon: abstract dis... Candidate of Technical Sciences in the in the specialty 05.09.10 – Electrotechnology]. [Text]: - Almaty, 2009.

4 **Markovskij V.P., Zhankuanyshev M.K., Utegulov A.P., Ibragimova S.V., Koshkin I.V., Sarsenbaeva G.A.** Belsendirilgen komir ondiru zhonindegі elektr tekhnologiyalyk reaktordyn onimdiligin anyktauga. [Determination of the productivity of the electro-technological reactor for the production of activated carbon] [Text] *PSU Bulletin*, №1, 2020, p. 292-301.

5 **Bolotov A., Mashkina S.** Oborudovanie i tekhnologii proizvodstva aktivirovannyh uglej [Equipment and technologies for production of activated carbons] [Text]. *Scientific and Technical Digest «News of Science of Kazakhstan»*. 2007 (4). p.59-63. ISSN:1560-5655

6 **Ibragimova, S., Bolotov, A., Takenov, S.** (2017). Prospects of using vegetative raw material in modern technology of activated carbon production. [Text] *Multidisciplinary scientific journal “3i: intellect, idea, innovation - intelligence, idea, innovation” KGU named after A.Bajtursynov*, 2017 (4), p. 210-218. ISSN 2226-6070

7 GOST 33614-2015 Ugli aktivirovannyye. Nomenklatura pokazatelej kachestva [Activated carbons. Nomenclature of quality indicators]. [Text]

8 **Bolotov A.V., Mashkina S.V.** Svoystva aktivirovannogo uglya, poluchennogo v elektricheskom reaktore [Properties of activated carbon produced in an electrical reactor] [Text]// Bulletin of the National Engineering Academy of the Republic of Kazakhstan.–2009.– №1.– p.66-71.

9 **Ibragimova, S., Kushnir, V., Koshkin, I.** Electric Heating of Non-conductive Dispersed Raw Materials in Activated Carbon Production [Text]/ In: Radionov A.A., Gasiyarov V.R. (eds) Proceedings of the 6th International Conference on Industrial Engineering. ICIE 2021. Lecture Notes in Mechanical Engineering. Springer, Cham., p.1384-1392. doi:10.1007/978-3-030-54817-9\_161

10 **Sun, J., Wu, G., & Wang, Q.** (2005). The effects of carbonization temperature on the properties and structure of PAN-based activated carbon hollow fiber. [Text] Journal of Applied Polymer Science, 97(5), 2155–2160. doi:10.1002/app.21955

11 **Daley, M. A., Tandon, D., Economy, J., & Hippo, E. J.** (1996). Elucidating the porous structure of activated carbon fibers using direct and indirect methods. [Text] Carbon, 34(10), 1191–1200. doi:10.1016/0008-6223(96)00065-6.

29.10.24 ж. баспаға түсті.

20.01.25 ж. түзетулерімен түсті.

10.03.25 ж. басып шығаруға қабылданды.

\*С. В. Ибрагимова<sup>1</sup>, Н. С. Неберекутина<sup>2</sup>, Г. А. Сарсенбаева<sup>3</sup>

<sup>1,3</sup>Костанайский региональный университет имени А. Байтұрсынұлы, Республика Казахстан, г. Костанай

<sup>2</sup>ГАПОУ Челябинской области Политехнический колледж, Российская Федерация, г. Магнитогорск

Поступило в редакцию 29.10.24

Поступило с исправлениями 20.01.25

Принято в печать 10.03.25

## ВЛИЯНИЕ ЭЛЕКТРОФИЗИЧЕСКИХ СВОЙСТВ УГЛЕРОДОСОДЕРЖАЩИХ МАТЕРИАЛОВ НА ПАРАМЕТРЫ ПРОЦЕССА ПОЛУЧЕНИЯ АКТИВИРОВАННОГО УГЛЯ

*В работе исследуется влияние температурного режима на электрофизические свойства углеродосодержащих материалов, в условиях прямого и косвенного нагрева сопротивлением. Полученные результаты используются в разработке технологии*

*получения активированного угля из отходов растительного производства электротехнологическим способом. Исследование электрофизических свойств сырья позволит определить этапы формирования внутренней структуры активированного угля, избежать перегрева или недогрева материала, которое может привести к деформации частицы и изменению ожидаемых свойств сорбента. В работе экспериментально выведены зависимости удельного электрического сопротивления образцов различных видов графита в диапазоне температур, регламентированных принятой технологией производства активированного угля. Установлено, что характеристика имеет экспоненциально снижающийся характер. Однако, при достижении температуры приблизительно 400 °С электрофизические характеристики различного типа углей сближаются, что говорит о приобретении ими одинаковых свойств. Исследования, представленные в работе, являются исключительно важными для реальных условий технологического процесса, когда непосредственное измерение температуры внутри объема перерабатываемого материала является технически трудно осуществимым. Поэтому, предложенный в работе бесконтактный способ измерения температуры, основанный на ее вольтовой индикации, рассматривается как перспективный и не требует сложных решений, связанных с модификацией технологического оборудования.*

*Ключевые слова: активированный уголь, сорбент, электротехнологический метод, растительное сырье, нагрев, электрофизические свойства, вольтовый индикатор температуры.*

\*S. V. Ibragimova<sup>1</sup>, N. S. Neberekutina<sup>2</sup>, G. A. Sarsenbayeva<sup>3</sup>

<sup>1,3</sup>Non-profit limited company «Akhmet Baitursynuly Kostanay

Regional University», Kazakhstan, Kostanay

<sup>2</sup>SAPEI of Chelyabinsk Region Polytechnic College,

Russian Federation, Magnitogorsk

Received 29.10.24

Received in revised form 20.01.25

Accepted for publication 10.03.25

### INFLUENCE OF ELECTROPHYSICAL PROPERTIES OF CARBON-CONTAINING MATERIALS ON THE PARAMETERS OF THE PROCESS OF ACTIVATED CARBON PRODUCTION

*The paper studies the influence of temperature regime on the electrophysical properties of carbon-containing materials under conditions of direct and indirect resistance heating. The obtained results are used in the development of technology for obtaining activated carbon from plant wastes by electro-technological method. The study of electrophysical properties of raw materials will allow to determine the stages of formation of the internal structure of activated carbon, to avoid overheating or underheating of the material, which can lead to particle deformation and change the expected properties of the sorbent. In the work the dependences of specific electrical resistance of samples of different types of graphite in the range of temperatures regulated by the adopted technology of activated carbon production are experimentally derived. It was found that the characteristic has an exponentially decreasing nature. However, when the temperature reaches approximately 400 °C, the electrophysical characteristics of different types of coal converge, which indicates that they acquire the same properties. The studies presented in this paper are extremely important for real process conditions, when direct temperature measurement inside the volume of the processed material is technically difficult. Therefore, the non-contact method of temperature measurement proposed in this work, based on its volt indication, is considered to be promising and does not require complex solutions associated with modification of process equipment.*

*Keywords: activated carbon, sorbent, electro-technological method, vegetable raw materials, heating, electrophysical properties, volt temperature indicator.*

МРНТИ 28.23.37

<https://doi.org/>

\*Ж. А. Икрам<sup>1</sup>, Б. С. Омаров<sup>2</sup>, Н. К. Смайлов<sup>3</sup>

<sup>1</sup>КазНУ имени Аль-Фараби, Республика Казахстан, г. Алматы

<sup>2</sup>Международный университет информационных технологий, Республика Казахстан, г. Алматы

<sup>3</sup>Казахский национальный исследовательский технический университет имени К. И. Сатпаева, Республика Казахстан, г. Алматы

<sup>1</sup>ORCID: <https://orcid.org/0009-0001-8059-6590>

<sup>2</sup>ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-8341-7113>

<sup>3</sup>ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-7264-2390>

\*e-mail: [zhanserikz@gmail.com](mailto:zhanserikz@gmail.com)

### ДВУХДОМЕННЫЙ ПОДХОД К ОБНАРУЖЕНИЮ ПОДДЕЛЬНЫХ ЛИЦ

*В данной работе рассматривается новый двухдоменный подход к обнаружению поддельных лиц, ориентированный на повышение надежности и точности современных биометрических систем. Предлагаемая методология основана на уникальном сочетании анализа в пространственной области и детальном исследовании частотных характеристик, что достигается благодаря специально разработанной двухветвевой архитектуре. Первая ветвь обрабатывает аугментированные изображения, выявляя ключевые признаки в виде текстурных и цветовых аномалий, которые часто сопровождают попытки спуфинга. Вторая ветвь одновременно анализирует фурье-преобразования тех же изображений, позволяя обнаруживать повторяющиеся паттерны и другие высокочастотные искажения, не всегда заметные при классическом пространственном анализе. Для проверки эффективности модели использовался набор данных OULU-NPU, известный своей сложностью и разнообразием типов атак, включая распечатанные изображения, демонстрацию видео на экранах и использование 3D-масок. Результаты экспериментов подтвердили высокую точность классификации, свидетельствуя о способности модели надежно дифференцировать подлинные лица от сфабрикованных. Кроме того, достигнутые показатели близки к лучшим современным результатам, что указывает на высокую практическую ценность данного решения.*



*Таким образом, предложенный двухдоменный анализ, совмещающий пространственные и частотные признаки, открывает перспективы дальнейшего совершенствования механизмов защиты, в особенности для систем, критичных к ошибкам аутентификации и уязвимых к все более изощренным методам подделки.*

*Ключевые слова: биометрия, компьютерное зрение, определение живости, нейронные сети, Фурье преобразование.*

## Введение

Технологии защиты от подделки лиц имеют критическое значение в современных биометрических системах безопасности. С распространением систем распознавания лиц в повседневной жизни – от разблокировки смартфонов до систем контроля в аэропортах – растет и изощренность атак злоумышленников, что требует создания более совершенных защитных механизмов [1;2;3;4;5].

Исторически сложилось, что методы противодействия спуфингу лиц фокусировались преимущественно на анализе признаков в пространственной области. Исследователи разрабатывали алгоритмы для выявления аномалий в текстурах, цветовых распределениях и движениях, характерных при использовании фотографий, видеозаписей или масок [6;7;8]. Несмотря на определенную эффективность, эти методы значительно уступают перед высококачественными подделками, имитирующими естественные характеристики живого лица.

Развитие исследований в области частотного анализа открыло новые перспективы. Применение преобразований Фурье и вейвлет-анализа позволило выявлять частотные аномалии, незаметные при пространственном анализе [9;10;11;12;13] – отсутствие микротекстуры кожи или наличие характерных муаровых паттернов при атаках с использованием цифровых экранов.

Однако применение только одного из этих подходов имеет принципиальные ограничения. Пространственный анализ может не обнаруживать тонкие аномалии в продвинутых атаках, а частотные методы могут упускать визуальные артефакты, очевидные в пространственном представлении [14].

## Материалы и методы

Точное разграничение подлинных изображений лиц и сложных спуфинг-атак представляет значительную проблему в области защиты систем распознавания лиц. Современные методы обмана, использующие высококачественные фотографии, видео воспроизведение, трехмерные маски и другие технологии, обладают уникальными характеристиками,

требующими тонких механизмов обнаружения [15;16;17]. Эффективная система защиты должна умело анализировать и интерпретировать сложные визуальные признаки для разграничения этих атак от законных попыток доступа.

Суть проблемы можно сформулировать следующим образом: при получении видеопотока необходимо точно определить, соответствует ли представленное изображение лица реальному, живому человеку (подлинная попытка), или это попытка обмана с использованием фотографий, видео на экране или высококачественных масок.

Для решения этой задачи наша модель использует стратегию двойной оптимизации, основанную на интеграции функций потерь бинарной кросс-энтропии (1) и среднеквадратической ошибки (2). Этот подход повышает точность обнаружения путем эффективного использования признаков из пространственной и частотной областей при минимизации указанных функций.

Функция потерь бинарной кросс-энтропии играет ключевую роль в ветви модели, отвечающей за анализ пространственной области, и направлена на улучшение способности системы точно классифицировать видеопоследовательности.

$$MSE = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (y_i - \hat{y}_i)^2 \quad (1)$$

$N$  – общее количество пикселей

$y_i$  – настоящие пиксельные значения

– предсказанные пиксельные значения

Минимизация функции потерь бинарной кросс энтропии позволяет модели оттачивать свои предсказания, становясь более умелой в выявлении несоответствий, сигнализирующих о попытке обмана.

$$BCELoss = -\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (y_i * \log(\hat{y}_i) + (1 - y_i) * \log(1 - \hat{y}_i)) \quad (2)$$

$N$  – общее количество сэмплов

$y_i$  – разметка

$\hat{y}_i$  – предсказанная вероятность

В ветви анализа частотной области среднеквадратичная ошибка (MSE) измеряет расхождение между фактическими и предсказанными частотными представлениями изображений. Оптимизация по MSE позволяет модели выявлять тонкие нерегулярности в частотных структурах – часто явные признаки спуфинг-атаки.

При оптимизации этих целевых функций мы сталкиваемся с несколькими ключевыми проблемами:

#### 1 Разнообразие и качество данных

Значительную сложность представляет вариативность качества данных и многообразие типов спуфинг-атак. Видеоматериалы могут существенно различаться по разрешению, условиям освещения и фоновым помехам, что влияет на способность модели к обобщению. Более того, сложность современных атак – от простых фотографий до сложных 3D-масок и дипфейков – требует от модели обучения широкому спектру признаков для точной классификации.

#### 2 Переобучение и обобщение

Высокая размерность видеоданных и сложность двухдоменного подхода создают риск переобучения на тренировочном наборе. Критически важно обеспечить хорошее обобщение модели на новые видео, особенно с применением неизвестных ранее техник спуфинга или снятые в нестандартных условиях. Для снижения риска переобучения мы применяем регуляризацию, аугментацию данных и кросс-валидацию.

#### 3 Балансировка функций потерь

Оптимизация комбинированной целевой функции, включающей потери BCE и MSE, требует тщательной балансировки. Относительные веса этих функций могут значительно влиять на производительность модели, определяя соотношение между анализом в пространственной и частотной областях. Поиск оптимального баланса — нетривиальная задача, требующая обширного экспериментирования.

#### 4 Вычислительная сложность

Двухдоменный подход по своей природе увеличивает вычислительную сложность. Обработка видео в обеих областях и оптимизация комбинированной функции требуют существенных вычислительных ресурсов. Для управления этой сложностью необходимы эффективная реализация и использование аппаратных ускорителей, таких как GPU.

### Архитектура

Наш подход к обнаружению поддельных лиц базируется на двухветвевой архитектуре (Рисунок 1), использующей признаки как из пространственной, так и из частотной областей. Процесс включает предобработку входных изображений, извлечение признаков и их обработку через две специализированные ветви модели.

Для предварительной обработки мы используем каскадные сверточные сети MTCNN [18], которые изменяют размер, обрезают и выравнивают каждое лицо до единого разрешения 512×512 пикселя. Такая стандартизация создает оптимальные условия для последующего извлечения признаков.

В качестве основы для извлечения признаков мы выбрали архитектуру EfficientNet-V2S [19], предварительно обученную на наборе данных ImageNet. Этот выбор представляет собой оптимальный компромисс между вычислительной эффективностью и точностью извлечения характеристик, что важно для анализа в обеих доменных областях.

#### Ветвь анализа пространственной области

Для повышения устойчивости к различным типам атак применяется серия аугментаций изображений. После этого изображения обрабатываются сетью EfficientNet-V2S. Полученные логиты, отражающие вероятность подлинности изображений, используются для расчета потерь BCE. Этот механизм фокусируется на пространственных характеристиках, указывающих на возможную подделку.

#### Ветвь анализа частотной области

Вторая ветвь исследует особенности в частотной области. Карты признаков, полученные после третьего блока сети EfficientNet-V2S, обрабатываются специализированной CNN, разработанной для частотного анализа. Эта CNN включает шесть сверточных слоев с ядрами 3×3 или 1×1, каждый из которых сопровождается пакетной нормализацией и функцией активации ReLU. После третьего сверточного слоя используется механизм отсева с вероятностью 0.3 для предотвращения переобучения. Архитектура завершается пятым сверточным слоем, формирующим одноканальную карту, эффективно сжимающую признаки для точного анализа.



## Рисунок 1 – Архитектура разработанной модели

Целевым выходом для этой ветви является FFT-изображение лица, полученное из предобработанного изображения  $512 \times 512$ . Вычисляя среднеквадратичную ошибку между выходом CNN и FFT-изображением, модель оценивает свою способность выявлять аномалии в частотной области.

**Набор данных**

В исследовании использовался набор данных OULU-NPU [20] как показано на Рисунке 2, содержащий около 5000 видео от более 50 субъектов для оценки возможностей обнаружения «живости» лица. Из каждого видео было выбрано 10 кадров с интервалом от начала до 200-го кадра, что в сумме дало около 50000 изображений. Этот набор включает кадры, снятые на шести различных устройствах в трех различных условиях освещения, что имитирует разнообразие реальных условий.

OULU-NPU оценивает производительность модели по 4 протоколам:

Протокол I проверяет адаптивность к новым условиям освещения и фона

Протокол II оценивает устойчивость к новым типам атак

Протокол III исследует влияние вариативности камер

Протокол IV тестирует генерализацию при комбинации новых условий,

типов атак и источников камер

Для оценки эффективности системы используются следующие метрики:

Attack Presentation Classification Error Rate – частота неправильной классификации поддельных изображений как подлинных

Bonafide Presentation Classification Error Rate – частота неправильной классификации подлинных изображений как поддельных

Average Classification Error Rate – среднее значение между APCER и BPCER, представляющее общую производительность системы

Эксперименты проводились на системе с графической картой RTX 4070, Обучение выполнялось с размером батча 16, оптимизатором Adam (вес распада  $3e-5$ ), начальной скоростью обучения 0.001 и 20 эпохами. Применялись различные аугментации: горизонтальное отражение, регулировка контраста/гаммы/яркости, эластичные и оптические искажения, сдвиг, масштабирование и вращение для обогащения вариативности данных.



Рисунок 2 – Лицо, атака с распечатанной бумагой и атака с помощью видео

**Результаты и обсуждение**

Результаты экспериментов в Таблице 1, выполненных по четырем протоколам, демонстрируют различия в значениях APCER, BPCER и ACER в зависимости от условий проверки.

Таблица 1 - Результаты модели

Protocol	APCER (%)	BPCER (%)	ACER (%)
1	1.4	3.2	2.3
2	2	2.8	2.4
3	$3.0 \pm 3.1$	$4.4 \pm 2.6$	$3.7 \pm 3.5$
4	$5.3 \pm 4.2$	$4.7 \pm 3.6$	$5.0 \pm 4.0$

При проведении испытаний в условиях стабильного освещения и фона (Протокол I) достигнуты значения APCER равное 1,4 %, BPCER – 3,2 % и средний показатель ACER – 2,3 %. Испытания на устойчивость к новым типам атак (Протокол II) дали значения APCER 2,0 %, BPCER 2,8 % и ACER 2,4 %. Более сложные сценарии, учитывающие вариативность камер, изменения освещения и комбинированные атаки, характеризуются увеличением ошибок: для Протокола III показатели составляют APCER  $3,0 \pm 3,1$  %, BPCER  $4,4 \pm 2,6$  % и ACER  $3,7 \pm 3,5$  %, а для Протокола IV – APCER  $5,3 \pm 4,2$  %, BPCER  $4,7 \pm 3,6$  % и ACER  $5,0 \pm 4,0$  %. Результаты подтверждает высокую эффективность модели в условиях, характеризующихся относительной однородностью данных, что отражается в минимальных значениях ошибок для Протокола I. Умеренное увеличение APCER и BPCER в Протоколе II свидетельствует о способности системы корректно распознавать новые

типы атак без существенного смещения в сторону ложноположительных или ложноотрицательных срабатываний. Значительный рост показателей ошибок в Протоколах III и IV указывает на сложность задач, возникающих при работе с разнообразными условиями эксплуатации, и подчеркивает актуальность дальнейшей оптимизации модели. Наблюдаемые стандартные отклонения демонстрируют влияние факторов внешней изменчивости, что требует дополнительных исследований, направленных на усиление обобщающих возможностей системы в динамичных и непредсказуемых условиях.

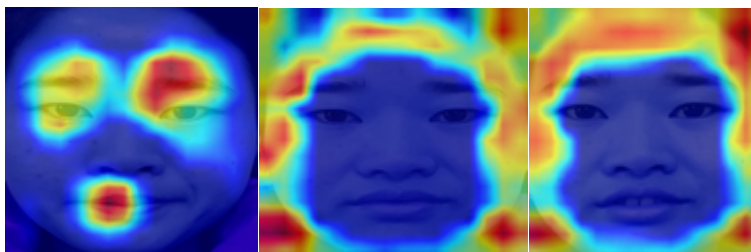


Рисунок 3 – Результаты интерпретации модели с помощью Grad-Cam. Живое лицо, распечатанное лицо и видео воспроизведение

Визуализация на Рисунке 3, полученная с помощью Grad-CAM, демонстрирует заметное различие в распределении внимания модели для живого лица, распечатанного изображения и видео воспроизведения. Для реального лица наблюдается более равномерная концентрация активаций в областях глаз, носа и рта, что соответствует характерным признакам подлинной живости. При анализе распечатанного лица акцент смещается на текстурные и цветовые несоответствия, возникающие из-за отражений и особенностей бумажной поверхности. В случае видео воспроизведения обнаруживается повышенная реакция на артефакты, вызванные электронным экраном, такими как муаровые узоры и неестественные световые переходы. Разница в тепловых картах подтверждает способность разработанной архитектуры эффективно выявлять уникальные аномалии для каждого типа спуфинга, обеспечивая высокую точность дифференциации подлинных и поддельных изображений.

#### Выводы

Результаты проведенного исследования демонстрируют высокий потенциал предлагаемого двухдоменного подхода к обнаружению поддельных лиц. Предложенная методология, основанная на интеграции анализа в пространственной и частотной областях, обеспечивает надежное различие между реальными и фальсифицированными изображениями.

Экспериментальные данные подтверждают, что объединение глубоких признаков из аугментированных изображений с детализированным анализом их фурье-преобразований приводит к значительному снижению ошибок классификации. Полученные показатели свидетельствуют о практической применимости разработанной модели для защиты биометрических систем в условиях сложных и динамичных атак. Перспективы дальнейших исследований включают оптимизацию вычислительной эффективности, расширение обучающих выборок и адаптацию архитектуры для выявления новых типов спуфинг-атак, что позволит повысить общую устойчивость систем распознавания лиц в реальных сценариях эксплуатации.

#### СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

- 1 Li, H., Li W., Cao, H., Wang, S., Huang, F., Kot, A. C. Unsupervised Domain Adaptation for Face Anti-Spoofing // IEEE Transactions on Information Forensics and Security. – 2018. – Vol. 13, No. 7, pp. 1794–1809. – DOI: 10.1109/TIFS.2018.2801312.
- 2 Kollreider, K., Fronthaler, H., Bigun, J. Non-intrusive liveness detection by face images // Image and Vision Computing. – 2009. – Vol. 27, Issue 3, pp. 233–244. – DOI: 10.1016/j.imavis.2007.05.004.
- 3 Zhang, S., Liu, A., Wan, J., Liang, Y., Guo, G., Escalera, S., Escalante, H. J., Li, S. Z. CASIA-SURF: A Large-Scale Multi-Modal Benchmark for Face Anti-Spoofing // IEEE Transactions on Biometrics, Behavior, and Identity Science. – 2020. – Vol. 2, No. 2, pp. 182–193. – DOI: 10.1109/TBIOM.2020.2973001.
- 4 Lei, Li, Zhaoqiang, Xia, Xiaoyue, Jiang, Fabio, Roli, Xiaoyi, Feng. CompactNet: learning a compact space for face presentation attack detection // Neurocomputing. – 2020. – Vol. 409, pp. 191–207. – DOI: 10.1016/j.neucom.2020.05.017.
- 5 Wang, Z., Yu, Z., Wang, X., Qin, Y., Li, J., Zhao, C., Liu, X., Lei, Z. Consistency Regularization for Deep Face Anti-Spoofing // IEEE Transactions on Information Forensics and Security. – 2023. – Vol. 18, pp. 1127–1140. – DOI: 10.1109/TIFS.2023.3235581.
- 6 Feng, L., Po, L.-M., Li, Y., Xu, X., Yuan, F., Cheung, T. C.-H., Cheung, K.-W. Integration of image quality and motion cues for face anti-spoofing: A neural network approach // Journal of Visual Communication and Image Representation. – 2016. – Vol. 38, pp. 451–460. – DOI: 10.1016/j.jvcir.2016.03.019.
- 7 Wang, C., Zhou, J. An adaptive index smoothing loss for face anti-spoofing // Pattern Recognition Letters. – 2022. – Vol. 153, pp. 168–175. – DOI: 10.1016/j.patrec.2021.12.006.

8 **Liu, M., Mu, J., Yu, Z., Ruan, K., Shu, B., Yang, J.** Adversarial learning and decomposition-based domain generalization for face anti-spoofing // Pattern Recognition Letters. – 2022. – Vol. 155, pp. 171–177. – DOI: 10.1016/j.patrec.2021.10.014.

9 **Guangcheng, Wang, Zhongyuan, Wang, Kui, Jiang, Baojin, Huang, Zheng, He, Ruimin, Hu.** Silicone mask face anti-spoofing detection based on visual saliency and facial motion // Neurocomputing. – 2021. – Vol. 458, pp. 416–427. – DOI: 10.1016/j.neucom.2021.06.033.

10 **Chang, H.-H., Yeh, C.-H.** Face anti-spoofing detection based on multi-scale image quality assessment // Image and Vision Computing. – 2022. – Vol. 121, Article 104428. – DOI: 10.1016/j.imavis.2022.104428.

11 **Jia, S., Hu, C., Li, X., Xu, Z.** Face spoofing detection under super-realistic 3D wax face attacks // Pattern Recognition. – 2021. – DOI: 10.1016/j.patrec.2021.01.021.

11 **Bonomi, M., Pasquini, C., Boato, G.** Dynamic texture analysis for detecting fake faces in video sequences // Journal of Visual Communication and Image Representation. – 2021. – Vol. 79, Article 103239. – DOI: 10.1016/j.jvcir.2021.103239.

12 **Ur Rehman, Y. A., Po, L.-M., Liu, M.** SLNet: Stereo face liveness detection via dynamic disparity-maps and convolutional neural network // Expert Systems with Applications. – 2020. – Vol. 142, Article 113002. – DOI: 10.1016/j.eswa.2019.113002.

13 **Chettri, B., Kinnunen, T., Benetos, E.** Deep generative variational autoencoding for replay spoof detection in automatic speaker verification // Computer Speech & Language. – 2020. – Article 101092. – DOI: 10.1016/j.csl.2020.101092.

14 **Monteiro, J., Alam, J., Falk, T. H.** Generalized end-to-end detection of spoofing attacks to automatic speaker recognizers // Computer Speech & Language. – 2020. – Article 101096. – DOI: 10.1016/j.csl.2020.101096.

15 **Peng, F., Qin, L., Long, M.** Face presentation attack detection based on chromatic co-occurrence of local binary pattern and ensemble learning // Journal of Visual Communication and Image Representation. – 2019. – Article 102746. – DOI: 10.1016/j.jvcir.2019.102746.

16 **Liu, Y., Liu, X.** Spoof Trace Disentanglement for Generic Face Anti-Spoofing // IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence. – 2023. – Vol. 45, No. 3, pp. 3813–3830. – DOI: 10.1109/TPAMI.2022.3176387.

17 **Zhang, K., Zhang, Z., Li, Z., Qiao, Y.** Joint Face Detection and Alignment using Multi-task Cascaded Convolutional Networks. – 2016.

18 **Tan, M., Le, Q. V.** EfficientNetV2: Smaller Models and Faster Training // arXiv preprint. – 2021. – arXiv: 2104.00298.

19 **Boulkenafet, Z., Komulainen, J., Li, L., Feng, X., Hadid, A.** OULU-NPU: A Mobile Face Presentation Attack Database with Real-World Variations // 2017 12th IEEE International Conference on Automatic Face & Gesture Recognition (FG 2017), Washington, DC, USA. – 2017. – 30 May–03 June. – DOI: 10.1109/FG.2017.77.

Поступило в редакцию 04.03.25

Поступило с исправлениями 04.03.25

Принято в печать 10.03.25

\*Ж. А. Икрам<sup>1</sup>, Б. С. Омаров<sup>2</sup>, Н. К. Смайлов<sup>3</sup>

<sup>1</sup>Әл-Фараби атындағы ҚазҰУ, Қазақстан Республикасы, Алматы қ.

<sup>2</sup>Халықаралық ақпараттық технологиялар университеті, Қазақстан Республикасы, Алматы қ.

<sup>3</sup>Қ.И. Сатпаев атындағы ҚазҰТЗУ, Қазақстан Республикасы, Алматы қ.

04.03.25 ж. баспаға түсті.

04.03.25 ж. түзетулерімен түсті.

10.03.25 ж. басып шығаруға қабылданды.

## ЕКІ ДОМЕНДІ ЖАЛҒАН БЕТТЕРДІ АНЫҚТАУҒА АРНАЛҒАН ТӘСІЛ

*Бұл жұмыста заманауи биометриялық жүйелердің сенімділігі мен дәлдігін арттыруға бағытталған жалған бет-бейнелерді анықтаудың жаңа екі домендік тәсілі қарастырылады. Ұсынылып отырған әдістеме кеңістіктік талдау мен жиілік сипаттамаларын терең зерттеуді біріктіретін арнайы әзірленген екі тармақты архитектураға негізделді. Бірінші тармақ оңделген кескіндерді талдап, спуфинг әрекеттерімен жиі байланысты болатын текстуралық және түстік ауытқулар сияқты негізгі белгілерді айқындайды. Екінші тармақ сол кескіндердің Фурье түрлендірулерін бір мезгілде зерттеп, дәстүрлі кеңістіктік талдауда әрдайым анықталмайтын қайталанатын үлгілер мен басқа да жоғары жиілікті бұрмалануларды анықтауға мүмкіндік береді. Модельдің тиімділігін бағалау үшін түрлі шабуыл түрлерінің күрделілігімен және әртүрлілігімен танымал OULU-NPU деректер жинағы пайдаланылды, онда қағазға басылған кескіндер, экрандарда бейнені көрсету және 3D маскаларды қолдану сияқты алуан түрлі әдістер қамтылған. Эксперименттік нәтижелер модельдің жалған бет-бейнелерді шынайыларынан сенімді ажырата алатындығын*

дәлелден, жіктеу дәлдігінің жоғары екенін көрсетті. Сонымен қатар, алынған көрсеткіштер ең үздік заманауи нәтижелерге жақын, бұл шешімнің тәжірибелік маңыздылығының жоғары екенін білдіреді. Осылайша, кеңістіктік және жиіліктік белгілерді біріктіретін ұсынылған екідомендік талдау аутентификация қателеріне сезімтал және барған сайын күрделіленіп келе жатқан спуфинг әдістеріне осал жүйелерді қорғау механизмдерін одан әрі жетілдіруге едәуір мүмкіндік береді.

*Кілтті сөздер:* Биометрия, компьютерлік көру, тіршілік анықтау, нейрондық желілер, Фурье түрлендіру.

\*Zh. A. Ikram<sup>1</sup>, B. S. Omarov<sup>2</sup>, N. K. Smailov<sup>3</sup>

<sup>1</sup>Al-Farabi Kazakh National University, Republic of Kazakhstan, Almaty

<sup>2</sup>International Information Technology University,  
Republic of Kazakhstan, Almaty

<sup>3</sup>Satbayev University, Republic of Kazakhstan, Almaty

Received 04.03.25

Received in revised form 04.03.25

Accepted for publication 10.03.25

## TWO-DOMAIN APPROACH TO DETECTING FAKE FACES

*In this paper, we present a novel two-domain approach for detecting fake faces aimed at improving the reliability and accuracy of modern biometric systems. Our proposed methodology is based on a unique combination of spatial domain analysis and a detailed investigation of frequency characteristics, achieved through a specially developed two-branch architecture. The first branch processes augmented images, identifying key features such as textural and color anomalies that often accompany spoofing attempts. The second branch simultaneously analyzes the Fourier transforms of these images, enabling the detection of repeating patterns and other high-frequency distortions not always noticeable through traditional spatial analysis. To evaluate the model's effectiveness, we employed the OULU-NPU dataset, recognized for its complexity and variety of attack types, including printed images, on-screen video demonstrations, and the use of 3D masks. The experimental results confirmed high classification accuracy, demonstrating the model's ability to reliably distinguish genuine faces from fabricated ones. Moreover, the achieved metrics are close to state-of-the-art results, indicating the strong*

*practical value of this solution. Consequently, the proposed two-domain analysis, which combines spatial and frequency features, offers significant prospects for further enhancing protective mechanisms, particularly for systems that are highly sensitive to authentication errors and vulnerable to increasingly sophisticated spoofing methods.*

*Keywords:* Biometrics, computer vision, liveness detection, neural networks, Fourier transform.

<https://doi.org/>

**А. А. Кенбай<sup>1</sup>, А. У. Алдияров<sup>2</sup>, \*Д. Е. Ережел<sup>3</sup>**

<sup>1,2</sup>Казахский Национальный Университет имени аль-Фараби,  
Республика Казахстан, г. Алматы

<sup>3</sup>Казахский Национальный Исследовательский Технический Университет  
имени К.И. Сатпаева, Республика Казахстан, г. Алматы

<sup>1</sup>ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-6803-5873>

<sup>2</sup>ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-5091-7699>

<sup>3</sup>ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-2232-2911>

\*e-mail: [darhan\\_13@physics.kz](mailto:darhan_13@physics.kz)

## **КРИОГЕННАЯ УСТАНОВКА ДЛЯ FTIR-СПЕКТРОСКОПИЧЕСКОГО ИССЛЕДОВАНИЯ ПОВЕДЕНИЯ УГЛЕВОДОРОДНЫХ СОЕДИНЕНИЙ ПРИ АТМОСФЕРНОМ ДАВЛЕНИИ**

*Предмет работы. Исследование углеводородных материалов при низких температурах и атмосферном давлении с помощью Fourier transform infrared (FTIR) спектроскопии и криогенно-капиллярной системы, позволяющими изучать оптические свойства различных веществ при атмосферном давлении в диапазоне температур 80–226 К без необходимости использования вакуума. Цель. Получение новых фундаментальных данных о поведении и свойствах углеводородных топлив в упомянутых выше условиях, так как исследования с помощью данной технологии не сильно распространены. Методика. Описана методика изучения углеводородов инфракрасным (ИК) Фурье-спектрометром, приставкой диффузного отражения и двумя сосудами Дьюара, один из которых предназначен для охлаждения образцов жидким азотом внутри криогенно-капиллярной системы, а второй – для создания ИК-неактивной среды, в которую помещаются образцы. Результаты. Получены FTIR-спектры характеристических пиков функциональных групп керосина C-H, отражающие колебания и их виды в определенных диапазонах волновых чисел, проведен анализ данных пиков и приведены сравнения с результатами исследований других авторов в этой области, отмечена хорошая корреляция результатов, что говорит об эффективности методики изучения.*

*Ключевые слова: Криогенно-капиллярная система, FTIR-спектроскопия, низкотемпературная ячейка, низкие температуры, керосин*

### **Введение**

На заре спектроскопии и с момента появления технологий, позволяющих изучать углеводородные соединения спектроскопическими методами при низких температурах, процесс сопровождался образованием вакуума, без которого было затруднительно изучать наноструктуру [1], молекулярный состав [2], физико-химические, термические и оптические свойства [3; 4; 5; 6] вещества из-за наличия в воздухе влаги и других примесей, препятствующих качественному исследованию и анализу вещества любым из спектроскопических методов, включая ИК-Фурье [7].

Низкотемпературное исследование веществ [8], в частности углеводородных соединений, подразумевающее использование ИК-спектроскопии, предполагает наличие сверхнизкого давления [9], т.е. вакуума, вследствие чего результаты качественных фундаментальных исследований оптических свойств углеводородных веществ при атмосферном давлении пока еще весьма редки, поскольку этот вопрос сопряжен с рядом проблем, таких как сложность разработки, поддержания и последующей модернизации технологий спектроскопического исследования, позволяющих достигать низких температур при атмосферных давлении, сложность создания инертной и ИК-неактивной или ИК-прозрачной среды [10], позволяющей достичь точности за счет низкого уровня шума спектров и высокой интенсивности излучения, а также отсутствие разработанной точной пошаговой методики исследования.

В целом, в мире существует очень мало технологий для изучения углеводородных веществ при низкой температуре и атмосферном давлении. Хотя некоторые исследования [11; 12] включают эксперименты по спектроскопии при атмосферном давлении и низких температурах, в этом направлении существует ограниченное количество научных исследований из-за проблем, описанных выше. Мы предлагаем технологию [13] для ИК-Фурье спектроскопического исследования углеводородных топлив при атмосферном давлении, но при низких (до 77 К) температурах, которая представляет решения вышеуказанных проблем при исследовании вне вакуума.

Идеей статьи является предлагаемая опытная установка криогенно-капиллярной системы с низкотемпературной ячейкой и методика измерения на ней, позволяющие получать принципиально новые фундаментальные данные о свойствах и поведении углеводородных материалов при низких температурах и атмосферном давлении, представляющие собой ценную

информацию, которая может способствовать последующему развитию качественных исследований в этом направлении, включая более фактические данные, связанные с действием молекул в этих условиях, что может в дальнейшем способствовать разработке более точного технологического оборудования. Данное исследование соответствует целям в соответствии с Целями устойчивого развития [14] ЦУР 4 – Качественное образование и ЦУР 9 – Промышленность, инновации и инфраструктура, принятыми ООН. Эти новые данные могут быть использованы при написании учебных пособий для студентов высшего образования технических вузов с направлением STEM, а также в качестве теоретических данных для сферы инновационной энергетики.

### Материалы и методы

Для получения качественных результатов низкотемпературных спектроскопических исследований углеводородных материалов при атмосферном давлении мы проводим эксперименты с использованием криогенно-капиллярной системы с низкотемпературной измерительной ячейкой. Для предоставления точной информации о спектроскопических данных углеводородов мы используем высокоточный Фурье-спектрометр среднего ИК-диапазона фирмы «Инфраспек» со спектральным разрешением  $0,125 \text{ см}^{-1}$  в диапазоне  $370\text{--}7800 \text{ см}^{-1}$  (рисунок 1).

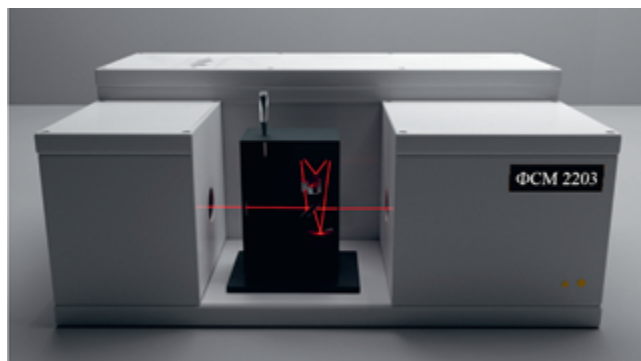


Рисунок 1 – Инфракрасный Фурье-спектрометр «ФСМ 2203» с приставкой диффузного отражения

Для проведения эксперимента по низкотемпературной спектроскопии диффузного отражения при атмосферном давлении нам понадобилось разработать установку, позволяющую изучать углеводородные вещества в этих условиях. Основное внимание уделяется возможности регулирования температуры исследуемого образца в приставке диффузного отражения

(рисунок 2), где образец располагается в кюветном отделении спектрометра ФСМ 2203. Особое значение имеет возможность снижения температуры до 77 К. Использование метода диффузного отражения влечет за собой минимальные требования к пробоподготовке и позволяет исследовать неровные поверхности и различные покрытия, включая полимеры. Кроме того, этот метод позволяет проводить спектральный анализ в широком диапазоне, что дает преимущество перед традиционными методами измерения на пропускание.

Первичная обработка полученных ИК-спектров проводится с помощью программного обеспечения FSpec, последующий анализ осуществляется с помощью программного обеспечения Origin.

Для того, чтобы добиться снижения температуры испытуемого образца внутри ячейки выдвижного держателя приставки, была реализована специально разработанная модификация на основе стандартного держателя образца (рисунок 3). Усовершенствованная конструкция держателя включает два основных материала: полилактид и медь. Выбор этих материалов для конкретных компонентов держателя основан на их соответствующих свойствах теплопроводности. Полилактид с теплопроводностью в диапазоне примерно от  $0,11$  до  $0,19 \text{ Вт/м} \cdot \text{К}$  выбран для противодействия неблагоприятному воздействию внешних температур как на медный стержень, так и на образцы, размещенные в измерительных ячейках.

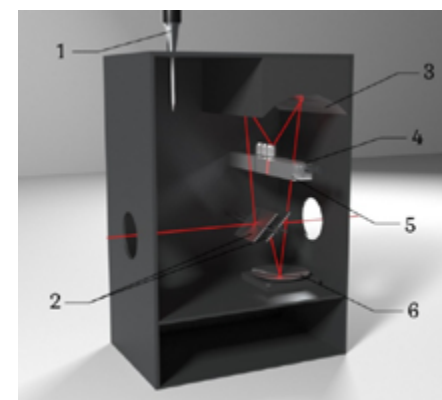


Рисунок 2 – Схематическое изображение приставки диффузного отражения: 1 – микрометрический винт; 2 – двухстороннее плоское зеркало; 3 – эллиптическое зеркало; 4 – выдвижной держатель образцов; 5 – направляющая; 6 – сферическое зеркало



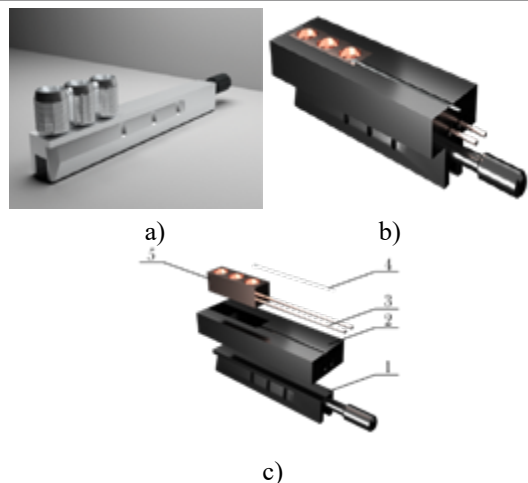


Рисунок 3. Трехмерная модель выдвижного держателя. а) стандартный выдвижной держатель образцов, б) модернизированный специализированный выдвижной держатель образцов в собранном виде, в) модернизированный специализированный выдвижной держатель образцов в разобранном виде. 1 – ручка держателя, 2 – теплоизолирующая крышка держателя, 3 – криогенно-капиллярная система, 4 – датчик температуры (термопара), 5 – контейнер

Охлаждение исследуемых образцов до температуры 77 К осуществляется непрерывным потоком жидкого и газообразного азота через медную трубку криогенной капиллярной системы.

Криогенно-капиллярная система соединена с упомянутым выше сосудом Дьюара через герметичную систему крепления (рисунок 4).

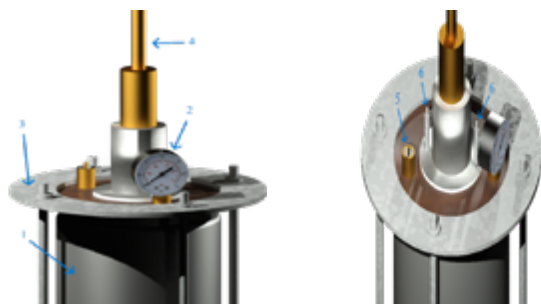


Рисунок 4 – Криогенная капиллярная система и сосуд Дьюара (термос)

Данная установка предназначена для подачи и охлаждения образцов при атмосферном давлении в низкотемпературной ячейке с постоянной циркуляцией жидкого и газообразного азота (77 К) через медные капилляры.

Для обеспечения чистоты эксперимента в приставку диффузного отражения была встроена система продувки с помощью газификатора. С вводом в приставку газообразного азота, создается инертная среда, которая не только предохраняет образцы и медный стержень от образования инея, но и поддерживает целостность эксперимента за счет создания ИК-неактивной среды.

Структура газификатора показана на рисунке 5.

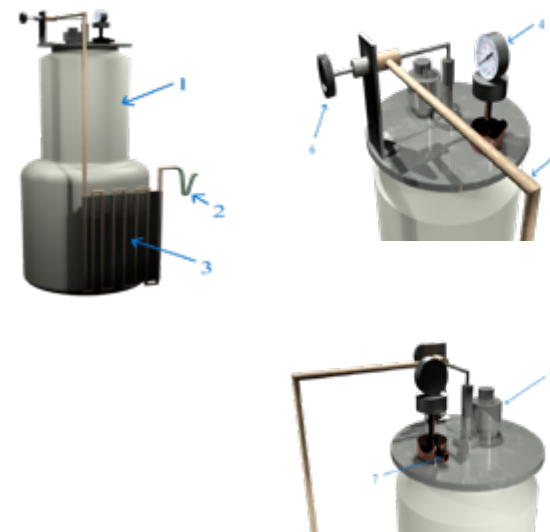


Рисунок 5 – Газификатор, генерирующий азот для инертной ИК-неактивной среды

Температура образцов в ячейках контейнера изменяется по мере того, как мы охлаждаем их потоком азота или нагреваем их, останавливая циркуляцию азота. Нам необходимо знать точную температуру образцов при снятии спектра. Для измерения температуры образца мы используем термопару типа Е (хромель и константан), подключенную к криогенному ПИД-регулятору температуры LakeShore Model 325.

После этого нам необходимо проанализировать спектры, полученные в ходе этого эксперимента, и оформить результаты. Эти исследования и

эксперименты могут быть использованы в качестве фундаментальной информации для многих спектроскопических исследований углеводородных материалов, поскольку результаты получены при низкой температуре, но при атмосферном давлении. Но перед этим важно сравнить наши результаты с другими данными получения спектров углеводородов с использованием низкотемпературных установок.

### Результаты и обсуждение

Результаты эксперимента, проведенного авторами в рамках данной работы с помощью криогенно-капиллярной системы, представлены на рисунке 6. Испытуемое вещество – керосин.

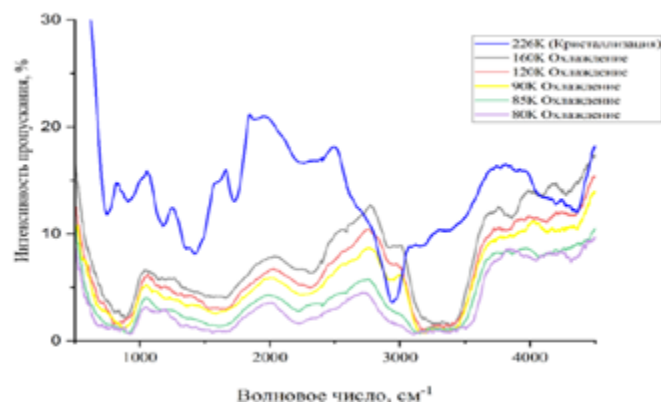


Рисунок 6 – Спектры пропускания керосина при охлаждении от комнатной температуры (показано только несколько температур)

На данном спектре пропускания видны характерные пики функциональных групп керосина, в частности, растяжения и изгибы связей С-Н, также можно заметить тенденцию сдвига пика растяжения С-Н связи относительно фазового перехода (кристаллизации). Как мы видим, наблюдается выраженный гипсохромный сдвиг для растяжения С-Н в диапазоне волновых чисел 3200-3500 см<sup>-1</sup>.

Ниже приведены результаты других авторов (рисунок 7) [15] и сравнительный анализ с нашим экспериментом. В данном графике вышеуказанное колебание соответствует длине волны при нормальных условиях: растяжение С-Н при 2800-3000 см<sup>-1</sup>.

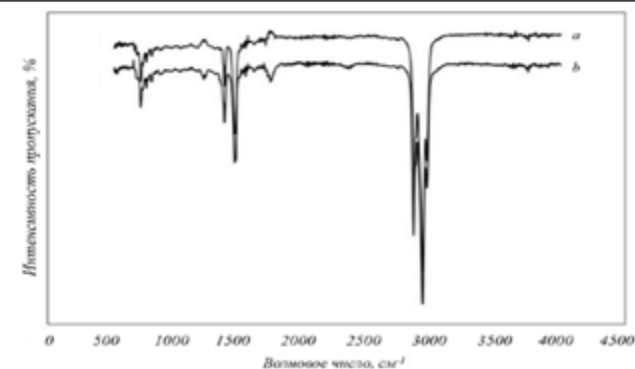


Рисунок 7 – ИК-спектры пропускания керосина (а) до и (б) после ультразвукового облучения.

Результаты других ученых приведены на рисунке 8 [16] – все характеристические пики, соответствующие FTIR-спектрам керосина в нашем исследовании, в частности колебаниям С-Н, присутствуют,

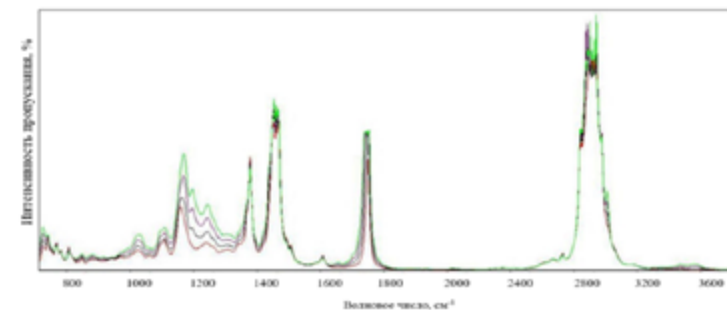


Рисунок 8 – ИК-спектры пропускания керосин+биодизель

что дополнительно подтверждает работоспособность и эффективность метода измерения, использованного в нашем исследовании.

Больше FTIR-спектров других авторов в этой области [17] приведены на рисунке 9. Мы можем видеть те же самые характерные пики, которые мы наблюдали в предыдущих сравнениях, в частности, растяжение С-Н при 2800-3000 см<sup>-1</sup>, изгиб С-Н (ножницы) при 1500 см<sup>-1</sup> и изгиб С-Н (качание и выход из плоскости) при 800 см<sup>-1</sup>. Несмотря на то, что керосин смешан с

бензином, все эти вещества состоят из компонентов С (углерод) и Н (водород), колебания которых рассматриваются в нашем исследовании.

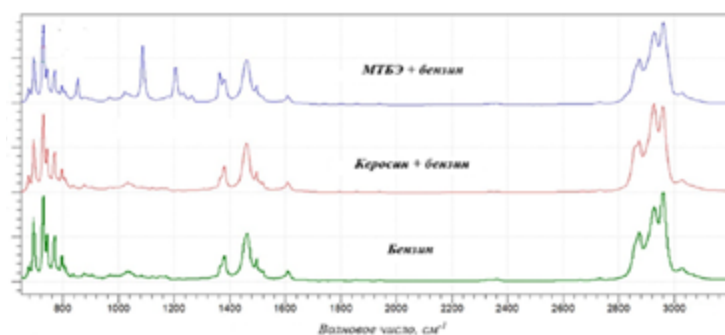


Рисунок 9 – Спектры пропускания ИК-Фурье образцов, смешанных с МТБЭ, керосином и бензином, при 650–3200 см<sup>-1</sup>.

Гипсохромный сдвиг обусловлен тем, что исследуемый образец (керосин) охлаждался из жидкой фазы от температуры 300 К до 77 К, претерпевая фазовый переход, что в совокупности не могло не повлиять на конечный результат FTIR-спектра, а также влиянием не вакуумной среды.

Приведенный сравнительный анализ доказывает работоспособность и эффективность нашей установки с низкотемпературной ячейкой и криогенно-капиллярной системой, используемыми в наших экспериментах при низких температурах (от 300 К до 80 К) и атмосферном давлении (101 325 Па, 1 атм).

#### Выводы

В данной работе описана экспериментальная установка и методика измерений для исследования углеводородных соединений, в частности керосина, при низких температурах и атмосферном давлении с использованием криогенно-капиллярной системы с системой продувки азотом, газификатора и ИК Фурье-спектрометра высокого разрешения. Проверка, проведенная путем сравнения FTIR-спектров керосина, полученных с помощью нашей установки, с результатами FTIR-спектров, представленных другими исследователями, позволяет сделать вывод о наличии хорошей корреляции.

Представленная установка имеет ряд преимуществ, таких, как возможность исследования низкотемпературных образцов при атмосферном давлении, получения принципиально новых фундаментальных данных о свойствах и структуре углеводородных веществ в необычных условиях и возможность представить ее научному сообществу в качестве нового работоспособного устройства для криогенных исследований при атмосферном давлении.

## СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1 Shaalan, N. M. (2024). An approach to fabricate nanomaterials using a closed low-temperature growth system. *Materials Chemistry and Physics*, 328, 129930. <https://doi.org/10.1016/j.matchemphys.2024.129930>

2 Carrascosa, H., Muñoz Caro, G. M., Martín-Doménech, R., Cazaux, S., Chen, Y.-J., & Fuente, A. (2024). Formation and desorption of sulphur chains (H<sub>2</sub>S x and S x ) in cometary ice: Effects of ice composition and temperature. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 533(1), 967–978. <https://doi.org/10.1093/mnras/stae1768>

3 Sokolov, D. Y., Yezhep, D., Vorobyova, O., Ramos, M. A., & Shinbayeva, A. (2022). Optical studies of thin films of cryocondensed mixtures of water and admixture of nitrogen and argon. *Materials*, 15(21), 7441. <https://doi.org/10.3390/ma15217441>

4 Sokolov, D. Y., Yezhep, D., Vorobyova, O., Golikov, O., & Aldiyarov, A. U. (2022). Infrared analysis and effect of nitrogen and nitrous oxide on the glass transition of methanol cryofilms. *ACS Omega*, 7(50), 46402–46410. <https://doi.org/10.1021/acsomega.2c05090>

5 Yezhep, D., Akybayeva, A., Golikov, O., Sokolov, D. Y., Shinbayeva, A., & Aldiyarov, A. U. (2023). Analysis of vibrational spectra of tetrafluoroethane glasses deposited by physical vapor deposition. *ACS Omega*, 8(22), 19567–19574. <https://doi.org/10.1021/acsomega.3c00985>

6 Golikov, O. Yu., Yezhep, D. E., & Sokolov, D. Yu. (2023). Researching carbon dioxide hydrates in thin films via FTIR spectroscopy at temperatures of 11–180 K. *Scientific and Technical Journal of Information Technologies, Mechanics and Optics*, 23(3), 483–492. <https://doi.org/10.17586/2226-1494-2023-23-3-483-492>

7 Xu, J., Liu, Q., Zheng, T., Xie, M., Shen, H., Li, Y., Guo, F., Zhang, Q., Duan, M., & Wu, K.-H. (2025). Comparing low-temperature NH<sub>3</sub>-SCR activity, operating temperature window and kinetic properties of the Mn-Fe-Nb/TiO<sub>2</sub> catalysts prepared by different methods. *Separation and Purification Technology*, 356, 129906. <https://doi.org/10.1016/j.seppur.2024.129906>

8 Moody, G., Kavir Dass, C., Hao, K., Chen, C.-H., Li, L.-J., Singh, A., Tran, K., Clark, G., Xu, X., Berghäuser, G., Malic, E., Knorr, A., & Li, X. (2015). Intrinsic homogeneous linewidth and broadening mechanisms of excitons in monolayer transition metal dichalcogenides. *Nature Communications*, 6(1), 8315. <https://doi.org/10.1038/ncomms9315>

9 Golikov, O. Yu., Yezhep, D., & Sokolov, D. Yu. (2023). Improvement of the automatic temperature stabilisation process in the cryovacuum unit. *Scientific*

and Technical Journal of Information Technologies, Mechanics and Optics, 23(1), 62–67. <https://doi.org/10.17586/2226-1494-2023-23-1-62-67>

10 **Dillinger, S., Mohrbach, J., Hewer, J., Gaffga, M., & Niedner-Schatteburg, G.** (2015). Infrared spectroscopy of N<sub>2</sub> adsorption on size selected cobalt cluster cations in isolation. *Physical Chemistry Chemical Physics*, 17(16), 10358–10362. <https://doi.org/10.1039/C5CP00047E>

11 **Serdyukov, V. I., Sinitisa, L. N., Lugovskoi, A. A., & Emel'yanov, N. M.** (2020). Liquid-nitrogen-cooled optical cell for the study of absorption spectra in a fourier spectrometer. *Atmospheric and Oceanic Optics*, 33(4), 393–399. <https://doi.org/10.1134/S1024856020040144>

12 **Serdyukov, V. I., Sinitisa, L. N., Lugovskoi, A. A., & Emelyanov, N. M.** (2019). Low-temperature cell for studying absorption spectra of greenhouse gases. *Atmospheric and Oceanic Optics*, 32(2), 220–226. <https://doi.org/10.1134/S1024856019020106>

13 **Kenbay, A. A., Golikov, O. Yu., Aldiyarov, A. U., & Yerezhep, D. E.** (2023). Low-temperature cell for IR Fourier spectrometric investigation of hydrocarbon substances. *Scientific and Technical Journal of Information Technologies, Mechanics and Optics*, 23(4), 696–702. <https://doi.org/10.17586/2226-1494-2023-23-4-696-702>

14 **Nguyen, T.-D., & Ngo, T. Q.** (2022). The role of technological advancement, supply chain, environmental, social, and governance responsibilities on the sustainable development goals of SMEs in Vietnam. *Economic Research-Ekonomska Istraživanja*, 35(1), 4557–4579. <https://doi.org/10.1080/1331677X.2021.2015611>

15 **Dollah, A., Zainol Rashid, Z., Hidayati Othman, N., Nurliyana Che Mohamed Hussein, S., Mat Yusuf, S., & Shuhadah Japperi, N.** (2018). Effects of ultrasonic waves during waterflooding for enhanced oil recovery. *International Journal of Engineering & Technology*, 7(3.11), 232. <https://doi.org/10.14419/ijet.v7i3.11.16015>

16 **Mirea, R., & Cican, G.** (2024). Theoretical assessment of different aviation fuel blends based on their physical-chemical properties. *Engineering, Technology & Applied Science Research*, 14(3), 14134–14140. <https://doi.org/10.48084/etasr.6524>

17 **Biaktluanga, L., Lalhruaitluanga, J., Lalramnghaka, J., & Thanga, H. H.** (2024). Analysis of gasoline quality by ATR-FTIR spectroscopy with multivariate techniques. *Results in Chemistry*, 8, 101575. <https://doi.org/10.1016/j.rechem.2024.101575>

Поступило в редакцию 25.12.24

Поступило с исправлениями 22.01.25

Принято в печать 10.03.25

*А. А. Кенбай<sup>1</sup>, А. У. Алдияров<sup>2</sup>, \*Д. Е. Ережеп<sup>3</sup>*

<sup>1,2</sup>эл-Фараби атындағы Қазақ Ұлттық Университеті,  
Қазақстан Республикасы, Алматы қ.

<sup>3</sup>Қ. И. Сәтбаев атындағы Қазақ Ұлттық Техникалық Зерттеу университеті, Қазақстан Республикасы, Алматы қ.

25.12.24 ж. баспаға түсті.

22.01.25 ж. түзетулерімен түсті.

10.03.25 ж. басып шығаруға қабылданды.

## АТМОСФЕРАЛЫҚ ҚЫСЫМДА КӨМІРСУТЕК ҚОСЫЛЫСТАРЫНЫҢ ӘРЕКЕТТЕРІН FTIR СПЕКТРОСКОПИЯЛЫҚ ЗЕРТТЕУ ҮШІН КРИОГЕНДІ ОРНАТУ

*Жұмыс пәні. Fourier transform infrared (FTIR) спектроскопия және криогендік-капиллярлық жүйе арқылы төмен температура мен атмосфералық қысымдағы көмірсутек материалдарын зерттеу, вакуумды қажет етпестен 80 – 226 К температура диапазонында атмосфералық қысымдағы әртүрлі заттардың оптикалық қасиеттерін зерттеуге мүмкіндік береді. Мақсат. Жоғарыда аталған жағдайларда көмірсутек отындарының мінез-құлқы мен қасиеттері туралы жаңа іргелі мәліметтер алу, өйткені осы технологияны қолдану арқылы зерттеу өте кең таралған емес. Әдістеме. Көмірсутектерді инфрақызыл (ИК) Фурье-спектрометрмен, диффузды шағылысу префиксімен және екі Дьюар ыдысымен зерттеу әдістемесі сипатталған, олардың бірі үлгілерді криогендік-капиллярлық жүйенің ішіндегі сұйық азотпен салқындатуға арналған, ал екіншісі үлгілер орналастырылған ИК белсенді емес ортаны құруға арналған. Нәтижелер. Толқындық сандардың белгілі бір диапазонындағы тербелістер мен олардың түрлерін көрсететін C-H керосиннің функционалды топтарының сипаттамалық шыңдарының FTIR спектрлері алынды, шыңдардың деректерін талдау жүргізілді және осы саладағы басқа авторлардың зерттеу нәтижелерімен салыстырулар келтірілді, нәтижелердің жақсы корреляциясы атап өтілді, бұл зерттеу әдістемесінің тиімділігін көрсетеді.*

*Кілтті сөздер: Криогенно-капиллярная система, FTIR-спектроскопия, низкотемпературная ячейка, низкие температуры, керосин.*

A. Kenbay<sup>1</sup>, A. Aldiyarov<sup>2</sup>, \*D. Yerezhep<sup>3</sup>

<sup>1,2</sup>Al-Farabi Kazakh National University, Republic of Kazakhstan, Almaty c.

<sup>3</sup>Satbayev University, Republic of Kazakhstan, Almaty c.

Received 25.12.24

Received in revised form 22.01.25

Accepted for publication 10.03.25

## CRYOGENIC SETUP FOR FTIR-SPECTROSCOPIC RESEARCH OF HYDROCARBON COMPOUNDS BEHAVIOR UNDER ATMOSPHERIC PRESSURE

*Subject of the work. Study of hydrocarbon materials at low temperatures and atmospheric pressure using Fourier transform infrared (FTIR) spectroscopy and a cryogenic capillary system, allowing to study the optical properties of various substances at atmospheric pressure in the temperature range of 80 – 226 K without the need for vacuum. Objective. Obtaining new fundamental data on the behavior and properties of hydrocarbon fuels under the above-mentioned conditions, since studies using this technology are not very widespread. Methodology. The paper describes a technique for studying hydrocarbons using an infrared (IR) Fourier spectrometer; a diffuse reflectance attachment, and two Dewar vessels, one of which is designed to cool samples with liquid nitrogen inside the cryogenic capillary system, and the second to create an IR-inactive environment in which the samples are placed. Results. FTIR spectra of characteristic peaks of kerosene functional groups C-H were obtained, reflecting vibrations and their types in certain ranges of wave numbers, analysis of these peaks was carried out and comparisons with the results of studies of other authors in this field were given, a good correlation of the results was noted, which indicates the efficiency of the study methodology.*

*Keywords: Cryogenic capillary system, FTIR spectroscopy, low temperature cell, low temperatures, kerosene.*

МРНТИ 45.41.31

<https://doi.org/>

\*A. P. Kulikov<sup>1</sup>, V. V. Kaverin<sup>2</sup>, A. M. Zyuzev<sup>3</sup>, V. M. Druzhinin<sup>4</sup>

<sup>1</sup>IC-NRG, Republic of Kazakhstan, Almaty

<sup>2</sup>Abylkas Saginov Karaganda Technical University, Republic of Kazakhstan, Karaganda

<sup>3</sup>Ural Federal University named after the First President of Russia B.N. Yeltsin, Russian Federation, Ekaterinburg

<sup>4</sup>Karaganda Industrial University, Republic of Kazakhstan, Temirtau

<sup>1</sup>ORCID: <https://orcid.org/0009-0007-3908-8432>

<sup>2</sup>ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-2021-7445>

<sup>3</sup>ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-2233-2730>

<sup>4</sup>ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-7261-8780>

\*e-mail: [anatoliy.kulikov1990@gmail.com](mailto:anatoliy.kulikov1990@gmail.com)

## MODELING OF AN INDUCTION MOTOR DRIVEN BY A FREQUENCY CONVERTER

*The article presents the results of the theoretical studies conducted. A simulation model of an asynchronous electric drive with frequency regulation was created in the Matlab Simulink software environment. This model was used to develop a dual-motor electric drive for a belt conveyor. The main attention is paid to calculating the parameters of the mathematical model of the engine. The simulation model considers the characteristics of industrial equipment installed at the facilities of mining companies in the Republic of Kazakhstan. The developed model is based on the principles of vector control with cross-coupling compensation, which ensures high quality of dynamic characteristics and stability to external disturbances. Theoretical and experimental results confirming the effectiveness of the proposed control system are presented. The resulting simulation model can be used to design and modernize industrial electric drives in the mining industry. Additionally, methods for increasing the energy efficiency of the system by optimizing the control parameters are considered. Analysis of transient and stationary processes showed that the proposed approach allows minimizing the impact of external disturbances and ensuring stable operation of the equipment. The developed model can also be integrated into automated control systems to improve their functionality and reliability. The research results demonstrate the high accuracy of the model and its*

*applicability in industrial conditions to improve productivity and reduce energy costs.*

*Keywords: induction motor, electric drive, frequency converter, energy efficiency, simulation model.*

### Introduction

Equipping production machines and mechanisms with an adjustable electric drive is a solution to an important scientific and technical problem, ensuring an increase in technical and economic indicators, reliability and safety of operation of the manufactured equipment. The use of an adjustable electric drive allows for the implementation of an increase in the reliability and service life of mining equipment. This technology is of particular importance for large enterprises in Kazakhstan, such as Kazakhmys and KAZZINC, where frequency-controlled systems successfully solve automation problems.

The objective of this study is to investigate the dynamic processes of electric drives during the startup mode with various types of controllers. The developed simulation model of an induction motor with a frequency converter ensures precise control, minimizes the impact of disturbances, and stabilizes equipment operation under varying load conditions.

### Materials and methods

To build a simulation model of the studied object, a mathematical model of an asynchronous motor must be developed, and its parameter values calculated numerically. Parameter calculation was performed using the methodology described in [1; 2; 3; 4; 5; 6]. The object of study is a variable-speed electric drive of a belt conveyor powered by Siemens motors. In the mathematical model, a Siemens motor was used; however, the technical documentation for this motor does not provide data on the equivalent circuit parameters necessary for further calculations. To calculate the model parameters, a motor from the 4A series with similar specifications was used. The equivalent circuit parameters were taken from the handbook by A.E. Kravchik [7, p. 29]. The selected motor, 4A355M4U3, has factory characteristics similar to the motors installed in the studied object, except for the degree of protection. The Siemens motors installed at the study site have a protection degree of IP55, while the chosen analog from the handbook has an IP44 rating. This difference is due to variations in housing and winding insulation design and does not affect the motor's electromagnetic properties. The nameplate data of the motors installed in the studied object are presented in Table 1. The equivalent circuit parameters of the 4A355M4U3 motor are given in Table 2.

Table 1 – Nameplate data for the Siemens motor

Symbol	Description	Value	Unit
$P_N$	Rated shaft power	315	kW
$U_{s\phi N}$	Rated phase voltage (RMS)	220	V
$\eta$	Efficiency	96	%
$\cos \phi$	Power factor	0.83	-
$f_N$	Rated supply frequency	50	Hz
$S_N$	Rated slip	0.67	%
$n_N$	Rated speed	1490	rpm
$J_D$	Motor inertia moment	5.4	

Table 2 – Equivalent circuit parameters for the 4A355M4U3 motor

Symbol	Description	Value	Unit
$x_{\mu r}$	Magnetizing reactance	5.7	r.u.
$r'_{1r}$	Active resistance of stator windings	0.012	r.u.
$x'_{1r}$	Inductive reactance of stator windings	0.099	r.u.
$r''_{2r}$	Active resistance of the rotor winding	0.014	r.u.
$x''_{2r}$	Inductive reactance of the rotor winding	0.14	r.u.

The rated stator winding current (RMS) is calculated using Equation (1):

$$U_{s\phi N} = \frac{P_N}{m_s \cdot U_{s\phi N} \cdot \cos \phi \cdot \eta} = \frac{315000}{3 \cdot 220 \cdot 0.83 \cdot 0.96} = 601 \quad (1)$$

where  $m_s$  is the number of stator winding phases.

The rated torque of the motor is determined by Equation (2):

$$M_N = \frac{30 \cdot P_N}{\pi \cdot n_N} = \frac{30 \cdot 315000}{3.1415 \cdot 1490} = 2019 \text{ N} \cdot \text{m} \quad (2)$$

Conversion of parameters to the «T-shaped» equivalent circuit is carried out using Equations (3)-(8):

$$c_1 = 1 + \frac{\sqrt{r_{1r}'^2 + x_{1r}'^2}}{x_{\mu r}} = 1 + \frac{\sqrt{0.012^2 + 0.099^2}}{5.7} = 1.017 \quad (3)$$

$$x_{\mu r} = x_{\mu r} = 5.7 \text{ r. u.} \quad (4)$$

$$r_{sr} = \frac{r_{1r}'}{c_1} = \frac{0.012}{1.017} = 0.012 \text{ r. u.} \quad (5)$$

$$x_{s\sigma r} = \frac{x_{1r}'}{c_1} = \frac{0.099}{1.017} = 0.097 \text{ r. u.} \quad (6)$$

$$r_{rr} = \frac{r_{2r}''}{c_1^2} = \frac{0.014}{1.017^2} = 0.0135 \text{ r. u.} \quad (7)$$

$$x_{r\sigma r} = \frac{x_{2r}''}{c_1^2} = \frac{0.14}{1.017^2} = 0.135 \text{ r. u.} \quad (8)$$

where  $p$ , the number of motor pole pairs.

### Results and discussion

The construction of a simulation model of a two-motor belt conveyor with a frequency-controlled asynchronous electric drive begins with the creation of a model of one asynchronous motor operating in conjunction with a frequency converter. This simulation model of a single motor will serve as the foundation for building the dual-motor system. To ensure high-quality dynamic transient processes and minimal sensitivity to external influences, the control of a variable-frequency electric drive must meet certain requirements.

The model of an asynchronous motor with a frequency converter was developed as a system with vector control and cross-coupling compensation. The simulation model of a variable-frequency asynchronous motor was created based

on data from several sources [8; 9; 10; 11; 12]. The structure of the closed-loop control system is shown in Figure 1 [6, p. 172].

The dynamic behavior of the asynchronous motor is described by two dynamic elements and one gain element, expressed by equations (9)-(11).

Considering the dynamic characteristics of the frequency converter requires the use of an external filter, which changes the time parameters of the system and is determined by the transfer function described by equation (12).

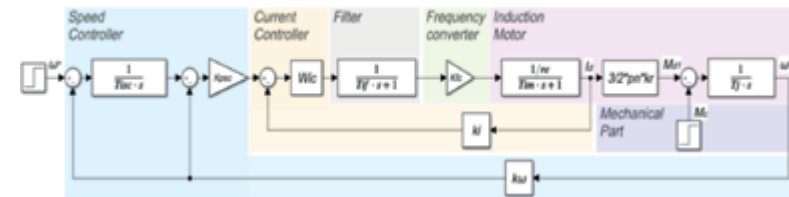


Figure 1 – Block diagram of the vector control system for a frequency-controlled asynchronous electric drive

The frequency converter is modeled as a gain element with a gain of  $k$ . The current PI controller is described by a dynamic link  $W_c(s)$  and a feedback loop with a gain  $k$ .

The speed controller is implemented as a PI controller, which includes a proportional element with a gain of  $k$  and an integrating element  $1/(T_m \cdot s)$ . Each element of the speed controller is placed in its own feedback loop with a gain of  $k$ .

$$W_1(s) = \frac{1/r_e}{T_{im} \cdot s + 1} \quad (9)$$

$$M_{d1} = \frac{3}{2} \cdot p_n \cdot k_r \cdot I_d \quad (10)$$

$$W_2(s) = \frac{1}{T_j \cdot s} \quad (11)$$

$$W_3(s) = \frac{1}{T_{if} \cdot s + 1} \quad (12)$$

In the block diagram of the closed-loop control system of the frequency-controlled asynchronous electric drive, the following designations are used:

$W_1(s)$  – transfer function describing the motor’s electromagnetic processes.

$W_2(s)$  – transfer function of the motor’s electromechanical part.

$W_3(s)$  – transfer function of the filter.

$\omega^*$  – reference input.

$\omega$  – controlled variable, the rotational speed of the motor shaft.

$Md_1$  – electromagnetic torque of the motor.

$M_c$  – static resistance torque.

$Id$  – current in the motor’s stator winding.

$p_n$  – number of pole pairs of the motor.

$k_r$  – rotor coupling coefficient.

$r_c$  – equivalent phase resistance of the motor.

$T_j$  – mechanical time constant of the motor.

$T_{im}$  – electromagnetic time constant of the motor.

$K_{fc}$  – frequency converter transfer coefficient.

$T_{if}$  – filter time constant.

$K_{psc}$  – proportional gain of the speed regulator.

$T_{isc}$  – speed regulator time constant.

The system’s motion equation is as follows:

$$J \cdot \frac{d\omega}{dt} = M_{d1} - M_c \quad (13)$$

where  $J$  – is the reduced moment of inertia.

The frequency converter transfer coefficient  $K_{fc}$ , as well as the feedback loop gain coefficients  $k_i$  and  $k_o$ , are assumed to be equal to one since these parameters are compensated by the regulators and do not affect process dynamics.

For tuning the current regulator to modular optimum, its transfer function must be [13, p. 82–91]:

$$W_{ic}(s) = \frac{T_{im} \cdot s + 1}{2 \cdot \frac{1}{r_s} \cdot T_{if} \cdot s} \quad (14)$$

The modular optimum for the speed regulator is achieved by adjusting the proportional gain:

$$K_{psc} = \frac{T_j}{4 \cdot \frac{3}{2} \cdot p_n \cdot k_r \cdot T_{if}} \quad (15)$$

To avoid a static error (Figure 3) under disturbance, an integrating component was added to the speed regulator, enclosed in an additional feedback loop (Figure 1). Maintaining the set speed regardless of the load and ensuring a smooth start-up of the conveyor is crucial. Introducing an integrator into the speed regulator increases the regulation time by 0.6 seconds but eliminates the static error (Figure 3). The time constant of the integrating component is calculated as follows:

$$T_{isc} = 8 \cdot T_{if} \quad (16)$$

The parameter calculations were performed using the equations presented in [1, p. 197–201].

The mechanical time constant of the motor:

$$T_j = \frac{\Omega_b}{p_n \cdot M_G} \cdot J_A = \frac{314,15}{2 \cdot 2019} \cdot 5,4 = 0,42 \text{ s} \quad (17)$$

The scattering inductance of the stator phase winding:

$$L_{s\sigma} = \frac{X_{s\sigma}}{\Omega_b} = \frac{0,036}{314,15} = 0,00011 \text{ H} \quad (18)$$

Rotor winding leakage inductance:

$$L_{r\sigma} = \frac{X_{r\sigma}}{\Omega_b} = \frac{0,05}{314,15} = 0,00016 \text{ H} \quad (19)$$

Equivalent leakage inductance of the Motor phase:

$$L_{\sigma} = L_{s\sigma} + k_r \cdot L_{r\sigma} = 0,00011 + 0,977 \cdot 0,00016 = 0,00027 \text{ H} \quad (20)$$

Equivalent Active resistance of the Motor phase:

$$R_{\sigma} = R_s + k_r^2 \cdot R_r = 0,004 + 0,977^2 \cdot 0,005 = 0,009 \text{ Ohm} \quad (21)$$



Electromagnetic time constant of the motor:

$$T_{lm} = \frac{L_s}{R_s} = \frac{0.00027}{0.009} = 0.03 \text{ s} \quad (22)$$

The parameters used to construct the simulation model, calculated in per-unit values, are given in Table 3.

Table 3 – Parameters for constructing the simulation model

Parameter	Value
	0.42
	0.977
	2
	0.024
	0.03
	0.06

The filter time constant was selected empirically based on the oscillogram of the real object presented in [6, p. 178].

Figures 2 and 3 show the oscillograms of the transient process of the motor's angular velocity under a unit step input with and without the use of an integrator in the speed regulator. A disturbance is applied to the system at  $t = 2$  s (Figure 3).

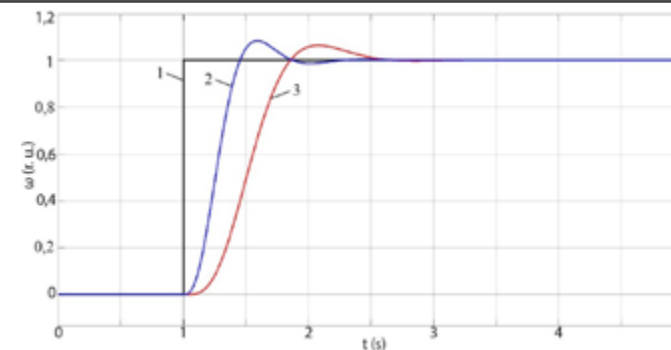


Figure 2 – angular velocity of the motor without load (0 r. u.)  
1 – reference input ; 2 – angular velocity of the motor without the integrator in the regulator; 3 – angular velocity of the motor with the integrator in the regulator

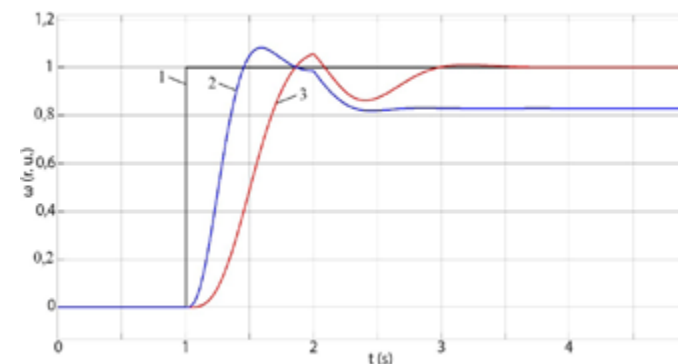


Figure 3 – Angular velocity of the motor under load (0,3 r. u.)  
1 – reference input ; 2 – angular velocity of the motor without the integrator in the regulator; 3 – angular velocity of the motor with the integrator in the regulator

As shown in Figure 3, the created closed-loop control system of an asynchronous electric drive with frequency regulation ensures stable dynamic transient processes and demonstrates low sensitivity to external disturbances. The simulation model can be used for further research.

The developed simulation model of the frequency-controlled asynchronous electric drive exhibits high efficiency in managing dynamic processes. The vector control system with cross-coupling compensation provides high-quality transient

processes and operational stability under disturbances. The main contribution of the proposed model is to minimize the static error and ensure smooth acceleration of the conveyor, which is confirmed by the oscillograms of transient processes.

Comparison with existing models confirmed that the use of controllers with individual feedback loops increases the stability of the system, and that tuning parameters according to the principle of modular optimum helps to increase energy efficiency. Unlike similar works, the proposed model is focused on practical application in industrial conditions, considering the characteristics of mining equipment.

The obtained results demonstrate the applicability of the model for analyzing various operational scenarios and optimizing the operation of conveyor equipment. Prospects for further research include the development of adaptive control systems capable of dynamically responding to load changes.

### Conclusions

The paper calculates the parameters of the equivalent circuit of an asynchronous motor considering its characteristics. A procedure for converting parameters into relative and absolute units is proposed, which ensures high accuracy of modeling.

A model of an asynchronous electric drive with frequency regulation and a vector control system has been developed in the Matlab Simulink environment, including dynamic compensation of cross-links. This made it possible to minimize the static error, ensure smooth acceleration and resistance to load disturbances.

The modeling results confirmed that the control system provides high-quality transient processes, meets the requirements of reliability and energy efficiency. The model is suitable for analyzing various scenarios of conveyor equipment operation and optimizing its operation, including adaptive control systems.

The created model allows to increase the efficiency of work, reduce energy consumption and extend the service life of equipment, which makes it attractive for use in industry.

### REFERENCES

1 **Мудров, М. В.** Разработка и исследование программно-аппаратного комплекса для испытаний и наладки электроприводов: дис. ... канд. техн. наук: 05.09.03. [Текст]. – Екатеринбург, 2020. – 235 с.

2 **Ершов, М. С., Комков, А. Н., Гамидов, О. М.** Определение параметров схемы замещения и основных характеристик короткозамкнутых асинхронных двигателей малой мощности на основе анализа сигналов тока и напряжения [Текст] // Электротехника. – 2022. – №2. – С. 63-68.

3 **Mashar, A. et al.** Determination of Three-Phase Induction Motor Equivalent Circuit Parameters Experimentally [Text] // Advances in Engineering Research. – 2020. – Vol. 198. – P. 209-214.

4 **Pustovetov, M., Shukhmin, K., Goolak, S. et al.** Approximate Calculations of Induction Motor Equivalent T-Shaped Circuit Parameters with the Use of Catalogue Data [Text] // In book: Induction Motor Computer Models in Three-Phase Stator Reference Frames: A Technical Handbook. – Singapore, 2023. – P. 10-23.

5 **Eremochkin, S., Dorokhov, D.** Analysis of Methods for Calculating Parameters of the Equivalent Circuit of a Squirrel Cage Induction Motor [Text] // Proceed. 28 th internat. scient. technical conf. Alternating Current Electric Drives (ACED). – Ekaterinburg, 2021. – P. 1-6.

6 **Kulikov, A., Kaverin, V., Zyuzev, A.** Optimizing the operation of a double-motor asynchronous frequency-controlled electric drive of the main belt conveyor in startup mode [Text] // International Journal on Energy Conversion. – 2023. – Vol. 11, Issue 5. – P. 170-182.

7 **Кравчик, А. Э., Шлаф, М. М., Афонин, В. И. и др.** Асинхронные двигатели серии 4А: справоч. [Текст]. – М.: Энергоиздат, 1982. – 504 с.

8 **Фираго, Б. И., Павлячик, Л. Б.** Регулируемые электроприводы переменного тока. [Текст]. – Минск: Техноперспектива, 2006. – 363 с.

9 **Shadkhin, Y. I., Toigozhinova, Zh. Zh.** Identification of transfer function of closed nonlinear frequency converter system – induction motor by using Matlab [Text] // Bulletin of National Academy of sciences of the Republic of Kazakhstan. – 2017. – Vol. 365. – P. 220-224.

10 **Kelisebekov, A. K., Daniyarov, N. A., Akhmetbekova, A. M. et al.** Control of starting modes of an apron conveyor multi-motor electric drive [Text] // Eurasian Physical Technical Journal. – 2021. – Vol. 18, Issue 4(38). – P. 74-81.

11 **Liu, C., Qin, D., Liao, Y.** Electromechanical dynamic analysis for the drum driving system of the long-wall shearer [Text] // Advances in Mechanical Engineering. – 2015. – Vol. 7, Issue 10. – P. 1-14.

12 **Bindu, S., Sumam, S. D. et al.** Non-Intrusive Methods to Detect Air-Gap Eccentricity Faults in Three-Phase Induction Motor [Text] // International Review of Electrical Engineering (IREE). – 2020. – Vol. 15, Issue 1. – P. 17805.

13 **Шрейнер, Р. Т.** Системы подчиненного регулирования электроприводов: учеб. пос. [Текст]. – Екатеринбург, 2008. – 279 с.

### REFERENCES

1 **Mudrov, M. V.** Razrabotka i issledovanie programmno-apparatnogo kompleksa dlya ispytaniy i naladki elektroprivodov: dis. ... kand. tekhn. nauk: 05.09.03. [Development and study of a hardware-software complex for testing

and commissioning of electric drives: dissertation for the degree of candidate of technical sciences: 05.09.03.] [Text]. – Ekaterinburg, 2020. – 235 p.

2 **Ershov, M. S., Komkov, A. N., Gamidov, O. M.** Opredelenie parametrov skhemy zameshcheniya i osnovnykh harakteristik korotkozamknutykh asinhronnykh dvigatelej maloj moshchnosti na osnove analiza signalov toka i napryazheniya [Determination of equivalent circuit parameters and main characteristics of low-power squirrel-cage induction motors based on current and voltage signal analysis] [Text] // Elektrotehnika. – 2022. – №2. – P. 63-68.

3 **Mashar, A. et al.** Determination of Three-Phase Induction Motor Equivalent Circuit Parameters Experimentally [Text] // Advances in Engineering Research. – 2020. – Vol. 198. – P. 209-214.

4 **Pustovetov, M., Shukhmin, K., Goolak, S. et al.** Approximate Calculations of Induction Motor Equivalent T-Shaped Circuit Parameters with the Use of Catalogue Data [Text] // In book: Induction Motor Computer Models in Three-Phase Stator Reference Frames: A Technical Handbook. – Singapore, 2023. – P. 10-23.

5 **Eremochkin, S., Dorokhov, D.** Analysis of Methods for Calculating Parameters of the Equivalent Circuit of a Squirrel Cage Induction Motor [Text] // Proceed. 28 th internat. scient. technical conf. Alternating Current Electric Drives (ACED). – Ekaterinburg, 2021. – P. 1-6.

6 **Kulikov, A., Kaverin, V., Zyuzev, A.** Optimizing the operation of a double-motor asynchronous frequency-controlled electric drive of the main belt conveyor in startup mode [Text] // International Journal on Energy Conversion. – 2023. – Vol. 11, Issue 5. – P. 170-182.

7 **Kravchik, A. E., Shlaf, M. M., Afonin, V. I. i dr.** Asinhronnye dvigateli serii 4A: spravochn. [Induction motors of the 4A series: reference guide] [Text]. – Moscow: Energoizdat, 1982. – 504 p.

8 **Firago, B. I., Pavlyachik, L. B.** Reguliruemye elektroprivody peremennogo toka. [Adjustable AC electric drives] [Text]. – Minsk: Tekhnoperspektiva, 2006. – 363 p.

9 **Shadkhin, Y. I., Toigozhinova, Zh. Zh.** Identification of transfer function of closed nonlinear frequency converter system – induction motor by using Matlab [Text] // Bulletin of National Academy of sciences of the Republic of Kazakhstan. – 2017. – Vol. 365. – P. 220-224.

10 **Kelisbekov, A. K., Daniyarov, N. A., Akhmetbekova, A. M. et al.** Control of starting modes of an apron conveyor multi-motor electric drive [Text] // Eurasian Physical Technical Journal. – 2021. – Vol. 18, Issue 4(38). – P. 74-81.

11 **Liu, C., Qin, D., Liao, Y.** Electromechanical dynamic analysis for the drum driving system of the long-wall shearer [Text] // Advances in Mechanical Engineering. – 2015. – Vol. 7, Issue 10. – P. 1-14.

12 **Bindu, S., Sumam, S. D. et al.** Non-Intrusive Methods to Detect Air-Gap Eccentricity Faults in Three-Phase Induction Motor [Text] // International Review of Electrical Engineering (IREE). – 2020. – Vol. 15, Issue 1. – P. 17805.

13 **Schreiner, R. T.** Sistemy podchinennogo regulirovaniya elektroprivodov: ucheb. pos. [Subordinate control systems for electric drives: textbook] [Text]. – Ekaterinburg, 2008. – 279 p.

Received 30.12.24

Received in revised form 13.01.25

Accepted for publication 10.03.25

\**А. П. Куликов<sup>1</sup>, В. В. Каверин<sup>2</sup>, А. М. Зюзев<sup>3</sup>, В. М. Дружинин<sup>4</sup>*

<sup>1</sup>С-NRG, Республика Казахстан, г. Алматы

<sup>2</sup>Карагандинский технический университет имени Абылкаса Сагинова, Республика Казахстан, г. Караганда

<sup>3</sup>Уральский Федеральный Университет имени первого Президента России Б. Н. Ельцина, Российская Федерация, г. Екатеринбург

<sup>4</sup>Карагандинский индустриальный университет,

Республика Казахстан, г. Темиртау

Поступило в редакцию 30.12.24

Поступило с исправлениями 13.01.25

Принято в печать 10.03.25

## МОДЕЛИРОВАНИЕ АСИНХРОННОГО ДВИГАТЕЛЯ УПРАВЛЯЕМОГО ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЕМ ЧАСТОТЫ

*В статье представлены результаты проведенных теоретических исследований. Создана имитационная модель асинхронного электропривода с частотным регулированием в программной среде Matlab Simulink. На основе данной модели разработан двухдвигательный электропривод ленточного конвейера. Основное внимание уделено расчету параметров математической модели двигателя. В имитационной модели учтены характеристики промышленного оборудования, установленного на объектах горнодобывающих компаний Республики Казахстан. Разработанная модель основывается на принципах векторного управления с компенсацией перекрестных связей, что позволяет обеспечить высокое качество динамических характеристик и устойчивость к внешним возмущениям. Приведены теоретические и экспериментальные результаты, подтверждающие эффективность предложенной системы управления. Полученная имитационная модель может быть*

использована для проектирования и модернизации промышленных электроприводов в горнодобывающей отрасли. Дополнительно рассмотрены методы повышения энергоэффективности системы за счёт оптимизации параметров управления. Анализ переходных и стационарных процессов показал, что предложенный подход позволяет минимизировать влияние внешних возмущений и обеспечить стабильную работу оборудования. Разработанная модель также может быть интегрирована в системы автоматизированного управления для повышения их функциональности и надёжности. Результаты исследований демонстрируют высокую точность модели и её применимость в условиях промышленной эксплуатации для улучшения производительности и снижения энергозатрат.

Ключевые слова: асинхронный двигатель, электропривод, преобразователь частоты, энергоэффективность, имитационная модель.

\*А. П. Куликов<sup>1</sup>, В. В. Каверин<sup>2</sup>, А. М. Зюзов<sup>3</sup>, В. М. Дружинин<sup>4</sup>

<sup>1</sup>С-NRG, Қазақстан Республикасы, Алматы қ.

<sup>2</sup>Әбілқас Сағынов атындағы Қарағанды техникалық университеті, Қазақстан Республикасы, Қарағанды қ.

<sup>3</sup>Ресейдің тұңғыш президенті атындағы Орал федералдық университеті Б. Н. Ельцин, Ресей Федерациясы, Екатеринбург қ.

<sup>4</sup>Қарағанды индустриялық университеті, Қазақстан Республикасы, Теміртау қ.

30.12.24 ж. баспаға түсті.

13.01.25 ж. түзетулерімен түсті.

10.03.25 ж. басып шығаруға қабылданды.

## ЖИІЛІКТІ ТҮРҒАНДЫРУШЫМЕН БАСҚАРАЛАТЫН АСИНХРОНДЫҚ МОТОРДЫ СИМУЛАУ

Мақалада жүргізілген теориялық зерттеулердің нәтижелері берілген. Matlab Simulink бағдарламалық жасақтама ортасында жиілікті реттейтін асинхронды электр жетегінің имитациялық моделі жасалды. Осы үлгінің негізінде таспалы конвейерге арналған екі моторлы электр жетегі әзірленді. Негізгі назар қозғалтқыштың математикалық моделінің параметрлерін есептеуге аударылды. Имитациялық модельге Қазақстан Республикасындағы тау-кен компаниялары объектілерінде орнатылған өнеркәсіптік

жабдықтардың сипаттамалары енгізілді. Әзірленген модель айқас байланыстарды өтеу арқылы векторлық басқару принциптеріне негізделген, бұл динамикалық сипаттамалардың жоғары сапасын және сыртқы әсерлерге төзімділікті қамтамасыз етеді. Ұсынылған басқару жүйесінің тиімділігін растайтын теориялық және эксперименттік нәтижелер келтірілген. Алынған имитациялық модель тау-кен өнеркәсібіндегі өнеркәсіптік электр жетектерін жобалау және жаңғырту үшін қолданылуы мүмкін. Сонымен қатар, басқару параметрлерін оңтайландыру арқылы жүйенің энергия тиімділігін арттыру әдістері қарастырылған. Өтпелі және стационарлық процестердің талдауы ұсынылған тәсіл сыртқы әсерлердің әсерін барынша азайтуға және жабдықтың тұрақты жұмысын қамтамасыз етуге мүмкіндік беретінін көрсетті. Әзірленген модель автоматтандырылған басқару жүйелеріне олардың функционалдығы мен сенімділігін арттыру үшін интеграциялануы мүмкін. Зерттеу нәтижелері модельдің жоғары дәлдігін және оның өнеркәсіптік жағдайларда өнімділікті арттыру және энергия шығындарын азайту үшін қолданылуын көрсетеді.

Кілтті сөздер: асинхронды қозғалтқыш, электр жетегі, жиілік түрлендіргіші, энергия тиімділігі, модельдеу моделі.

<https://doi.org/>

**З. А. Кутпанова<sup>1</sup>, Д. О. Кожаметова<sup>2</sup>, Д. Н. Шандроноз<sup>3</sup>,  
Г. Н. Байсейітов<sup>4</sup>, \*Е. А. Оспанов<sup>5</sup>**

<sup>1</sup>Astana IT University, Республика Казахстан, г. Астана

<sup>2,5</sup>Университет Шакарима, Республика Казахстан, г. Семей,

<sup>3</sup>Института военно-инженерных работ по радиоэлектронике и связи,  
Республика Казахстан, г. Алматы

<sup>4</sup>Научно-исследовательский центр «Казахстан Инжиниринг» LLP,  
Республика Казахстан, г. Астана

<sup>1</sup>ORCID: <https://orcid.org/0009-0007-4860-9244>

<sup>2</sup>ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-4327-3899>

<sup>3</sup>ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-6904-8000>

<sup>4</sup>ORCID: <https://orcid.org/0009-0001-0154-0071>

<sup>5</sup>ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-5342-274X>

e-mail: [y.ospanov@shakarim.kz](mailto:y.ospanov@shakarim.kz)

## **ИННОВАЦИОННЫЕ МЕТОДЫ ПЛАНИРОВАНИЯ МАРШРУТОВ ДЛЯ БПЛА В ЭКСТРЕННЫХ СИТУАЦИЯХ**

*Использование множества беспилотных летательных аппаратов (БПЛА) позволяет эффективно доставлять первую помощь и необходимые материалы в районы, подвергшиеся стихийным бедствиям, таким как землетрясения, наводнения, оползни, лесные пожары. Использование беспилотников в таких ситуациях доказало свою важность, помогая ускорять восстановительные работы и минимизировать экономические потери. БПЛА сталкиваются с риском столкновения с птицами и другими объектами, особенно в зонах без сетевого покрытия. В условиях стихийных бедствий важно обеспечить своевременную доставку первой помощи, учитывая ограниченные ресурсы, такие как заряд батареи. Для этого нужно сбалансировать покрытие точек доставки, точность посадки и безопасность полета БПЛА. Модели Deep Q-network (DQN) широко используются для планирования маршрутов, но ранее редко учитывали некооперативные сценарии. В статье предлагается новая структура DQN, которая учитывает такие риски, как птицы и*

*неожиданные препятствия. Также создается уникальная система вознаграждений для улучшения покрытия доставки и безопасных посадок. Моделирование показало, что использование нескольких БПЛА может эффективно обеспечить доставку первой помощи в условиях бедствия.*

*Ключевые слова. Беспилотные летательные аппараты, многофункциональные БПЛА, обучение с подкреплением, глубокое Q-обучение.*

### **Введение**

Мульти- беспилотных летательных аппаратов (БПЛА) предлагают различные решения для доставки первой помощи и необходимых материалов в районы стихийных бедствий, например, пострадавшие от землетрясений, наводнений, оползней, лесных пожаров и пандемий [1]. Использование беспилотников в таких ситуациях доказало свою важность, помогая ускорять восстановительные работы и минимизировать экономические потери. Например, в 2021 году, во время шторма Ури, беспилотники ускорили восстановление после массовых отключений электричества. В Китае при наводнении в Хэнане БПЛА использовались для оценки ущерба и координации спасательных операций. Наводнение в Германии и Бельгии также показало их важность в оценке инфраструктуры. В США после урагана Ида и в Канаде после наводнения в Британской Колумбии беспилотники помогли с восстановлением и поисково-спасательными операциями. Землетрясения в Японии в 2022г. и Турции в 2023г, а также лесные пожары на Гавайях подтвердили эффективность БПЛА в экстремальных ситуациях.

Сложность окружающей среды (например, препятствия на местности, погодные условия и городская инфраструктура) и факторы производительности БПЛА (например, максимальная нагрузка, потребление энергии или дальность полета) влияют на решение с несколькими БПЛА во многих сценариях миссий [2, p.270-299; 3, p.153–170]. Недавно исследователи попытались решить эти проблемы, используя искусственный интеллект для планирования маршрутов нескольких БПЛА в различных ситуациях. В этой статье рассматриваются преимущества и применение ИИ в БПЛА с акцентом на типы и алгоритмы используемого ИИ, в частности, обучение с подкреплением и глубокое обучение, для повышения оперативности и эффективности действий во время таких кризисов.

Использование ИИ в БПЛА во время стихийных бедствий дает существенные преимущества. Во-первых, ИИ значительно повышает автономность БПЛА, что особенно важно в ситуациях, когда традиционные методы мониторинга и реагирования становятся недоступными или

опасными. Благодаря алгоритмам машинного обучения и компьютерному зрению БПЛА могут самостоятельно оценивать ситуацию, определять зоны повышенного риска и планировать оптимальные маршруты полета, избегая препятствий и обеспечивая максимальную безопасность миссии. Обучение с подкреплением, в частности, играет ключевую роль в этом процессе. Он позволяет БПЛА обучаться и адаптироваться к динамическим средам, постоянно совершенствуя политику принятия решений на основе обратной связи от окружающей среды.

Во-вторых, ИИ способствует повышению точности и скорости анализа данных, полученных от БПЛА. Например, используя методы глубокого обучения, БПЛА могут эффективно анализировать изображения и видео, снятые камерами высокого разрешения, для обнаружения признаков разрушений, идентификации жертв и оценки масштаба катастрофы. Сверточные нейронные сети (CNN) и другие архитектуры глубокого обучения используются для быстрой и точной обработки и интерпретации больших объемов визуальных данных. Это позволяет спасательным службам получать актуальную информацию в режиме реального времени, что критически важно для координации спасательных операций и принятия быстрых решений.

В-третьих, ИИ расширяет возможности прогнозирования и моделирования последствий стихийных бедствий. БПЛА, оснащенные ИИ, могут собирать и анализировать большие объемы данных о состоянии инфраструктуры, ландшафтов, погодных условий и других факторов. На основе этих данных ИИ может строить прогнозы развития ситуации, моделировать возможные сценарии и оценивать риски, что позволяет своевременно принимать меры по минимизации ущерба и подготовке к потенциальным угрозам. Модели глубокого обучения, включая рекуррентные нейронные сети (RNN) и сети с долговременной краткосрочной памятью (LSTM), особенно полезны для прогнозирования временных рядов и моделирования сценариев. Более того, ИИ в БПЛА значительно расширяет возможности координации и управления ресурсами в чрезвычайных ситуациях. Интеллектуальные системы могут автоматизировать процесс распределения и координации работы различных подразделений, обеспечивая оптимальное использование имеющихся ресурсов. Это помогает сократить время реагирования, повысить эффективность спасательных операций и снизить затраты. Алгоритмы обучения с подкреплением могут оптимизировать распределение ресурсов и планирование маршрутов, изучая лучшие стратегии путем проб и ошибок, повышая общую эффективность усилий по реагированию на чрезвычайные ситуации.

Модели на основе глубокого Q-обучения (DQN) [4, p.153-170; 5, p. 16663–16676] являются лучшим примером этого и показывают лучшие

результаты. Учитывая его эффективность в обработке сложных пространств состояний, захвате факторов, формулировании передовых тактик и принятии решений на основе предыдущих событий, в результате общее выполнение задач и сотрудничество между БПЛА были улучшены.

Если быть более конкретным, решения на основе DQN [6, p. 119941; 7, p. 281–295; 8, p. 119154; 9, p.100633; 10, p. 2893–2905; 11, p.110164] достигли одновременной навигации БПЛА и радиокартирования в трехмерном (3D) пространстве, используя дуэльный глубокий алгоритм DQN, основанный на процессе принятия решений Маркова (MDP) [12, p.4205-4220]. По этой причине была предложена структура, называемая глубоким обучением с подкреплением (DRL), для навигации БПЛА внутри помещений на основе частично наблюдаемого процесса принятия решений Маркова (POMDP) [13, p.1-14; 14, pp. 310–315]. Наконец, был представлен эталонный подход DQN, основанный на децентрализованном частично наблюдаемом марковском процессе принятия решений (Dec-POMDP) для использования стратегий планирования пути для нескольких БПЛА в плотной городской среде [15, p.1171-1187]. В частности, решение, предложенное в, успешно выполнило одновременную навигацию БПЛА и отображение радиосигналов в трехмерном (3D) пространстве. Это было достигнуто путем использования алгоритма дуэли глубоких Q-сетей (DQN), основанного на марковском подходе принятия решений (MDP). Поэтому исследователи предложили структуру глубокого обучения с подкреплением (DRL) для навигации БПЛА внутри помещений с использованием частично наблюдаемого марковского метода принятия решений (POMDP). В статье [15, p.1171-1187] представлен эталонный подход DQN, который использует децентрализованную частично наблюдаемую марковскую процедуру принятия решений (DecPOMDP) для разработки стратегии планирования пути для нескольких БПЛА в случайных, густонаселенных городских районах. Хотя текущие модели DQN для планирования БПЛА достигли выдающихся результатов, они по-прежнему сталкиваются с ограничениями, когда дело доходит до борьбы со стихийными бедствиями и конкурентными сценариями во время цикла миссии доставки. Этот тип сценария относительно широко распространен и имеет решающее значение, поскольку БПЛА все чаще используются для сложных миссий, таких как проведение расследований в городских районах, горах и лесах, пострадавших от стихийных бедствий. Чрезвычайное реагирование в сценариях стихийных бедствий требует точных и быстрых действий по доставке, когда в районах бедствия не будет надлежащей среды посадки БПЛА. Таким образом, традиционные системы сброса с воздуха (парашютные) могут не доставить полезную нагрузку в места доставки точно [16, p. p. 699-715] из-за погодных условий или технических проблем, таких

как проблема с выпуском. Система лебедки является наиболее оптимальным решением для точной доставки; однако эта система не рассматривалась в недавних исследованиях из-за ее высокого энергопотребления, что приводит к отказу БПЛА при возвращении на базу. С другой стороны, опасные зоны (скопления птиц) представляют серьезную угрозу для выполнения задач по доставке полезных грузов и удержанию БПЛА. Такой сценарий увеличивает сложность моделей DQN, что влияет на достижение оптимального планирования пути. Таким образом, БПЛА могут следовать жадной стратегии, где отдаленные районы могут не учитываться.

Известно, что популярный алгоритм Q-learning переоценивает значения действий при определенных условиях. Ранее не было известно, распространены ли на практике такие переоценки, вредят ли они производительности и можно ли их вообще предотвратить. RL можно использовать в DNN для аппроксимации функции значения, политики или других функций, которые помогают агенту принимать решения, а также для предварительной обработки входных данных, таких как изображения или данные датчиков, для извлечения полезных признаков для последующего анализа.

Однако сам DNN не включает алгоритм обучения с подкреплением. Он служит инструментом для представления и аппроксимации сложных функций.

Сети Deep Q (DQN) представляют собой конкретную реализацию глубокого обучения в контексте Q-обучения. DQN использует DNN для аппроксимации функции значения  $Q(s, a)$ , которая оценивает ожидаемое будущее вознаграждение для каждого состояния и действия. DQN продемонстрировал свою эффективность на различных задачах, включая знаменитую демонстрацию превосходного игрового процесса Atari.

Таблица 1 – Сравнение результатов соответствующих статей о дронах в управлении стихийными бедствиями на основе глубокого обучения

Страна	Название	Содержание	Прим
Испания (Abdulla A-K, Maria J.G-S, Francisco M.M, Arturo E., Jose M.A., 2019)	Алгоритм отслеживания на основе внешнего вида для целей воздушного поиска и спасения	- Позволяет отслеживать и идентифицировать несколько человек с инвариантностью к масштабу, перемещению и вращению точки обзора относительно целевых объектов в чрезвычайно сложных воздушных последовательностях.	Имитация поиска и спасения в дикой природе

Корея (Tran Q.T., Minsoo P., Daekyo J., Seunghye P., 2020)	Оценка карты поврежденных с использованием изображений БПЛА и алгоритмов глубокого обучения для системы управления стихийными бедствиями	- БПЛА Phantom 4 Pro V2 на высоте 150 м, интегрированный с алгоритмами сегментации изображений на основе глубокого обучения. - Эффективен при извлечении выгоревших участков из изображений БПЛА и способен оценивать карты областей, поврежденных лесными пожарами.	Лесной пожар
Китай (Lijiang L., Zhiyu Y., 2020)	Дрон доставляет медицинские принадлежности в Пуэрто-Рико по кратчайшему пути	- 7 типов дронов и 3 типа медицинских пакетов, распределенных с использованием алгоритма Дейкстры. - Повышает эффективность спасательных работ и эффективно распределяет спасательные материалы.	Ураган
США (Faine G, E.L. Nelson., Gregg P G., 2020)	Полет в ураган: пример использования БПЛА для оценки ущерба во время ураганов 2017 года в Техасе и Флориде - Возможность оценки ущерба, отображающего состояние домов после урагана по сделанным снимкам	- Отражение проблем при выходе на поле реагирования на стихийные бедствия, начиная от общественного восприятия и заканчивая созданием эффективного объединения. - Все еще неясно, где БПЛА вписываются в общую систему гуманитарного кластера. - Отсутствие централизованной системы для постановки задач, компиляции и обмена данными гуманитарных БПЛА между агентствами по оказанию помощи или НПО.	Ураганы в Техасе и Флориде

И DNN, и DQN играют важную роль в обучении с подкреплением, но они используются для разных задач и имеют свои собственные уникальные особенности и недостатки. Понимание этих различий и недостатков помогает в выборе подходящего метода для конкретной задачи и улучшении моделей.

Для проверки алгоритма, предложенного в других исследовательских работах, обучение проводилось в той же среде моделирования с фиксированными начальными и конечными точками для Original Q-learning,

Original DQN, Double DQN, Dueling DQN, Double and Prioritized replay, Dueling and Prioritized replay и алгоритма планирования пути корабля в этой работе для 1500 эпизодов. Среднее значение вознаграждения для каждого эпизода регистрировалось в процессе обучения. На рисунке ниже показаны результаты, при этом ось x представляет количество итераций обучения, а ось y показывает среднее значение вознаграждения для каждого раунда обучения.

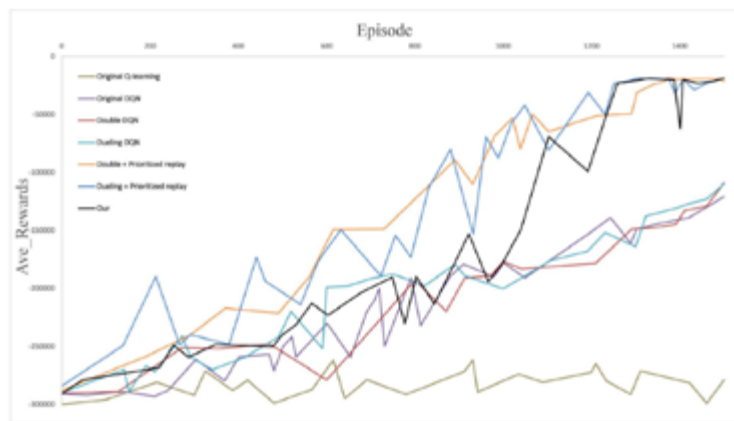


Рисунок 1 – Результаты вознаграждения для каждого эпизода обучения Original Q-learning, Original DQN, Double DQN, Dueling DQN, Double and Prioritized replay, Dueling and Prioritized replay

Результаты обучения для оригинального Q-обучения, оригинального DQN, двойного DQN, дуэльного DQN, двойного и приоритетного повтора, дуэльного и приоритетного повтора и алгоритма, предложенного в этой статье. На рисунке показана связь между количеством итераций обучения и величиной вознаграждения для каждого алгоритма

Поэтому мы изучаем проблему сотрудничества нескольких БПЛА в условиях стихийного бедствия с естественными влияниями на проблемы доставки, посадки и возврата груза. В этом случае нам необходимо учитывать мощность БПЛА, сложную среду и потенциальные угрозы из опасных зон. Эта миссия выполняется после того, как происходит стихийное бедствие, таким образом, группа БПЛА будет выпущена для доставки экстренных грузов в район бедствия и попытается приземлиться обратно в исходную зону. Планирование пути для БПЛА должно быть правильно выведено таким образом, чтобы было гарантировано покрытие точек доставки, в

то время как БПЛА обеспечивают энергоёмкость, крушение и отсутствие жадных стратегий. Между тем, предлагаемая модель может эффективно справляться с другими проблемами, такими как зона отсутствия связи, зона бесполетности (NFZ) и т. д.

Использование роя БПЛА дает значительные преимущества, особенно при доставке грузов после стихийных бедствий. Выживаемость системы с несколькими БПЛА заметно выше, чем у системы с одним БПЛА. Если один БПЛА в рое выходит из строя или сбивается, остальные БПЛА могут продолжить свою миссию без серьезных сбоев. Масштабируемость является еще одним ключевым преимуществом, поскольку системы с несколькими БПЛА могут легко расширить свой рабочий диапазон за счет развертывания дополнительных БПЛА, в отличие от одиночных больших БПЛА, которые имеют ограниченное покрытие. Скорость выполнения миссии повышается с помощью систем с несколькими БПЛА, поскольку они могут выполнять задачи параллельно, что значительно сокращает время, необходимое для операций по поиску и доставке.

Автономность в системах с несколькими БПЛА более продвинута, с бортовой автоматикой, позволяющей БПЛА независимо следовать плану полета и указаниям, что снижает необходимость постоянного контроля в реальном времени со стороны наземных пилотов. Эта автономность способствует экономической эффективности, поскольку миссии могут быть выполнены с меньшими затратами по сравнению с системами с одним БПЛА. Потребности в коммуникации упрощаются в системах с несколькими БПЛА, поскольку только один БПЛА должен поддерживать связь с наземным управлением, передавая сообщения другим БПЛА в рое. Наконец, для военных применений системы с несколькими БПЛА имеют меньшую эффективную площадь рассеяния, что повышает безопасность и скрытность операций.

Лесные пожары являются одними из самых серьезных стихийных бедствий, и их частота увеличивается с каждым годом. Лесные пожары вызывают значительные разрушения, и в процессе борьбы с ними гибнет много людей. Использование нескольких дронов для тушения пожаров может быть оптимальным решением сегодня.

Алгоритм обнаружения пожара, разработанный исследовательской группой в Индианском институте науки (IISc), является ключом к поведению дронов. «Температурные датчики в дронах определяют минимальное пороговое значение. Когда этот порог достигается, дроны уменьшают шаг поиска, указывая на то, что пожар близок», – объясняет Джози Джон, ведущий автор исследования [17. p.2860-2871].



Согласно формулировке проблемы, предлагается модель DQN для планирования пути нескольких БПЛА для точной доставки груза в сценарии стихийного бедствия, чтобы решить эти проблемы. Формулируем проблему, преобразуя сложную среду в сетчатый мир, а различные виды регионов — в различные наборы ячеек сетки, помеченных разными метками. Затем предлагаем модель DQN, которая может выводить планы действий для БПЛА распределенными способами, стремясь упростить проблему и снизить вычислительную нагрузку. Далее проектируем новое пространство состояний, состоящее из физического пространства, пространства опасностей, представляющего области риска столкновений, и пространства возврата, представляющего соответствующие значения доставки помощи в различные точки исследуя типичные стратегии картирования для создания Q-сети. Кроме того, функция вознаграждения улучшается путем введения штрафов, когда БПЛА непрерывно приземляются на срочных базах из-за энергетических проблем, непрерывно доставляют полезные грузы в несколько точек доставки, используют жадную стратегию и проходят опасные зоны. Таким образом, модель может помочь БПЛА избегать столкновений с птицами и доставлять полезные грузы в отдаленные и близкие районы.

#### **Материалы и методы**

В этом разделе объясняется формулировка проблемы пути нескольких БПЛА в сценариях стихийных бедствий. Мы рассматриваем три новых фактора, которые больше не обсуждаются в недавних исследованиях: полезная нагрузка на основе лебедки, зоны срочной посадки и опасные зоны.

Полезная нагрузка на основе лебедки представляет собой используемую систему строповки полезной нагрузки, где парашютный сброс может не обеспечить точную доставку. Зоны срочной посадки разработаны для представления реального сценария станций гражданской обороны. Предоставление БПЛА возможности срочной посадки при необходимости. Сбор птиц можно рассматривать как модель атаки, где риску подвергаются БПЛА и полезная нагрузка. Чтобы более конкретно рассмотреть эти параметры информации и модели системы и лучше понять их, мы определяем системную среду, модель БПЛА, модель доставки, модель атаки и задачу оптимизации соответственно.

Примером метода лебедки является проект Wing корпорации Alphabet (дочерней компании Google). Их беспилотный летательный аппарат, построенный по схеме летающего крыла с вертикальным взлетом и посадкой, доставляет грузы таким образом. После взлета самолет переходит в горизонтальное положение и летит как обычный самолет. По достижении пункта назначения груз опускается лебедкой. Этот метод особенно полезен в

ограниченном пространстве и позволяет осуществлять точную и безопасную доставку грузов.

Прямая посадка дрона на Место доставки подразумевает посадку дрона непосредственно в пункте назначения. Например, Amazon использует дроны VTOL для своей услуги Amazon Prime Air. Дроны получают информацию о грузе и месте доставки, автономно забирают груз из места хранения и доставляют его по воздуху, приземляясь в пункте назначения для передачи посылки. Это обеспечивает высокую точность и безопасность доставки в труднодоступных районах. Такой метод позволяет дрону напрямую взаимодействовать с конечным получателем, минимизируя риск потери или повреждения груза.

Использование различных способов доставки с помощью БПЛА обеспечивает гибкие и эффективные решения для оперативной доставки товаров в труднодоступные районы, особенно во время стихийных бедствий. Например, в рамках сервиса Amazon Prime Air компания планирует использовать дирижабли в качестве логистических центров для хранения товаров и запуска дронов. Это позволяет быстро доставлять предметы первой необходимости в зоны стихийных бедствий, минимизируя время доставки. В 2013 году DHL провела первые летные испытания, доставив посылки через реку Рейн. Дрон взлетал с одного берега, где оператор прикреплял груз, и летел на другой берег. Этот метод оказался успешным на расстоянии около одного километра, продемонстрировав потенциал использования БПЛА в различных условиях.

Еще одним примером является Zipline которая начала доставлять донорскую кровь и лекарства в Руанде с помощью БПЛА в 2016 году, что позволило оперативно снабжать медицинские учреждения необходимыми ресурсами во время стихийных бедствий. Этот проект продемонстрировал эффективность доставки на парашютах в реальных условиях и показал, насколько быстро и надежно можно доставлять жизненно важные грузы в отдаленные и труднодоступные районы. Использование таких технологий значительно увеличивает шансы на выживание и восстановление в пострадавших регионах.

#### **Результаты и обсуждение**

Для оптимизации эффективности миссий БПЛА крайне важно тщательно спроектировать точки доставки и стоимость миссии, принимая во внимание особые требования реальных миссий. Кроме того, важно изучить степень покрытия точек доставки. Поэтому цель оптимизации можно разделить на следующие ожидания:

– Количество безопасно и точно доставленных полезных грузов должно быть максимально точным.

– Охват доставки должен быть максимально высоким, что означает, что полезные грузы должны доставить как можно больше полезных грузов.  
 – Цель состоит в том, чтобы минимизировать потери, тем самым обеспечив безопасный возврат БПЛА в назначенные места посадки.

Таблица 2 - Таблица обозначений

Variable	Описание
$M \times M \in \mathbb{N}^2$	$M$ : длина стороны сетки мира
$M$	$\mathbb{N}$ : набор натуральных чисел
$L$	Набор всех позиций в сетке
$Z$	Набор стартовых/посадочных позиций
$B$	Набор высотных зданий и позиций NFZ
$\zeta$	Набор позиций покрытия без связи
$i$ -th	Набор позиций опасностей
$k$ -th	Конкретный БПЛА
$pi(t)$	Конкретная точка доставки
$\phi_i(t)$	Положение $i$ -го в пределах $t$ -го
$bi(t)$	Состояние работы $i$ -го в пределах $t$ -го
$A$	$i$ -й остается электрическим в пределах $t$ -го
$A(pi(t))$	Пространство действия каждого БПЛА
$E$	Отменить действие посадки, если $i$ -й находится за пределами зоны L
$e$	Общая емкость аккумулятора каждого БПЛА
$NFZ$	Единица стоимости электроэнергии

Затем задачу оптимизации можно оценить, вычислив три вышеупомянутых ожидания, где каждая часть соответствует одному из ожиданий:

$$\max_{a_i(t)} \delta \sum_{i=0}^T \sum_{m=1}^I C_i(t) + \beta \sum_{i=1}^I R_i + \gamma \sum_{i=1}^I Q_i. \tag{10}$$

Вес каждого ожидания определяется тремя константами, а именно  $\delta$ ,  $\beta$ , и  $\gamma$ .  $\sum_{i=0}^T \sum_{m=1}^I C_i(t)$  относится к общему количеству полезных грузов, доставленных I БПЛА за T временных интервалов.  $\sum_{i=1}^I R_i$  означает количество точек доставки,  $\sum_{i=1}^I Q_i$ , в которые были доставлены полезные грузы. указывает количество успешно вернувшихся БПЛА.

В этом разделе описывается предлагаемая модель. Во-первых, на рис. 2 изображен подход DQN, в котором каждый БПЛА ведет себя как независимый агент внутри определенной карты. Наша модель интегрировала пространство состояний, Q-сеть, функцию вознаграждения и функцию

действия, что означает, что агент принимает решение на основе текущей ситуации, используя функцию действия, и это решение затем оценивается и вознаграждается. Одновременно выполненное действие также приведет к соответствующей модификации состояния, следовательно, потенциально влияя на последующее действие. Чтобы понять механизм и рабочий процесс предлагаемой модели, мы представляем следующие ее компоненты: преобразование состояния с двойным представлением, пространство состояний, построение Q-сети, функцию вознаграждения и процесс обучения двойной DQN.

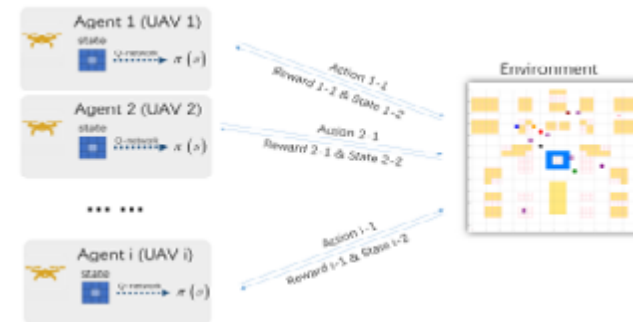


Рисунок 2 – Иллюстрация обучения с подкреплением для БПЛА

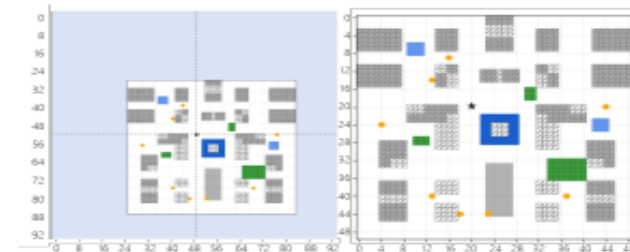


Рисунок 3 – Сцены входных карт, которые центрированы или не центрированы двумя способами. Местоположение БПЛА показано символом звезды и точкой, где соединяются пунктирные линии

**Преобразование состояния с двумя видами.**

Что касается различных БПЛА, для них важно сосредоточиться на контекстной информации в их близлежащих областях, таких как окрестности, места доставки и близлежащие БПЛА. Следовательно, крайне важно создать

представление состояния для каждого БПЛА, которое включает БПЛА, расположенный в центре карты. Однако, поскольку различные БПЛА могут быть развернуты в разных областях региона, может быть нереалистично иметь близлежащую область одинакового размера, что является необходимостью для глубокой Qnetwork. Таким образом, мы придерживаемся стандартной стратегии, чтобы расширить карту для каждого БПЛА.

Пространство состояний в стандартной модели DQN представляет собой полный набор возможных сценариев в среде. Мир сетки служит основой для создания пространства состояний, при этом каждой сетке присваивается номер, который представляет собой определенную особенность состояния в этой сетке. Станция управления будет глобально управлять состоянием всех БПЛА, включая планирование траектории полета каждого БПЛА. Это позволяет БПЛА сотрудничать друг с другом для успешного выполнения задачи и достижения желаемых целей. В этом исследовании мы определяем пространство состояний фокуса сценария как состоящее из трех измерений.

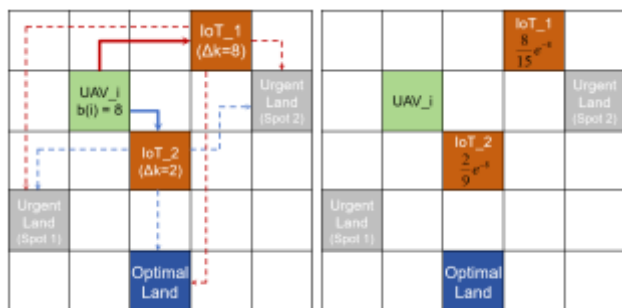


Рисунок 4 – Расчет оценки

Иллюстрация расчета оценки ставки вознаграждения при перемещении БПЛА в определенную сетку (например, зеленую сетку). Оценка учитывает шаги перемещения к сетке, расстояние между сетками, каждую точку доставки (DP - оранжевые сетки), оптимальную зону посадки (синяя сетка), зону срочной посадки (серая сетка), а также оставшиеся точки доставки.

$$\Omega = \Omega_{phy} \times \Omega_{hazard} \times \Omega_{return} \quad (11)$$

где  $\Omega_{phy}$  представляет собой физическую карту, которая может описывать области L, B и Z.  $\Omega_{hazard}$  – это карта опасностей, включающая

области скопления птиц, т. е.  $\Omega_{return}$  представляет собой карту частоты возврата, в которую включены как области срочной посадки, так и области оптимальной посадки.

Частота возврата – это метод представления состояния, разработанный для этой работы. Его цель – предложить точную оценку оставшегося срока службы батареи беспилотника в отношении ценности мест доставки (количество доставленных точек, покрытие удаленной области и расстояние действия).

### Информацию о финансировании

ИРН BR 249015/0224 «Создание инновационного комплексного продукта в дронной индустрии с использованием передовых технологий искусственного интеллекта»; соавторы Байсеитов Г.Н., Шандронов Д.Н., Кутпанова З.А.

### Заключение

В этой статье основное внимание уделяется вопросу планирования маршрута нескольких БПЛА в условиях стихийных бедствий, в частности решению проблемы доставки первой помощи в труднодоступные области. Предполагается, что опасные области представляют потенциальную опасность для птиц. Основной целью планирования маршрута является достижение точного и оптимального покрытия точек доставки для максимальной полезной нагрузки и установление подходящих посадочных станций. Таким образом, разрабатывается новая модель DQN для совместного планирования маршрута. Эта модель расширяет пространство состояний, включая подробную информацию о сложной среде.

Кроме того, функция вознаграждения улучшена для решения проблем безопасности и обеспечения оптимального покрытия в различных точках доставки для БПЛА. Кроме того, была принята во внимание возможность использования лебедочной системы сбрасывания для обеспечения точной доставки полезных грузов. В конечном итоге результаты моделирования показывают, что наша модель способна повысить производительность системы. В нашем предстоящем исследовании мы рассмотрим использование сложных моделей DQN для неконтролируемого планирования пути нескольких БПЛА. Это включает в себя предоставление БПЛА возможности независимо выполнять определенные задачи и общаться друг с другом, не полагаясь на серверы.

### ЛИТЕРАТУРА

1 Adel Merabet, Abderrahmane Lakas, Abdelkader Nasreddine Belkacem. WPT-enabled Multi-UAV Path Planning for Disaster Management Deep

Q-Network Dept. of Comp. and Netw. Engineering College of IT, UAE University, Al Ain, United Arab Emirates belkacem@uaeu.ac.ae IEEE 2023 International Wireless Communications and Mobile Computing (IWCMC) 979-8-3503-3339-8/23/\$31.00 ©2023 IEEE | DOI: 10.1109/IWCMC58020.2023.10183018).

2 **Aggarwal, S., Kumar, N.**, 2020. Path planning techniques for unmanned aerial vehicles: A review, solutions, and challenges. *Computer Communications* 149, P.270–299., <https://doi.org/10.1016/j.comcom.2019.10.014>

3 **Puente-Castro, A., Rivero, D., Pazos, A., Fernandez-Blanco, E.**, 2022. A review of artificial intelligence applied to path planning in uav swarms. *Neural Computing and Applications* 34, P.153–170. URL: <https://doi.org/10.1007/s00521-021-06569-4> , doi:10.1007/s00521-021-06569-4.

4 **Wang, X., Gursoy, M.C., Erpek, T., Sagduyu, Y.E.**, 2022. Learningbased uav path planning for data collection with integrated collision avoidance. *IEEE Internet of Things Journal* 9, P.16663–16676. doi:10.1109/JIOT.2022.3153585

5 **Zhu, X., Wang, L., Li, Y., Song, S., Ma, S., Yang, F., Zhai, L.**, 2022. Path planning of multi-uavs based on deep q-network for energy-efficient data collection in uavs-assisted iot. *Vehicular Communications* 36, 100491. URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2214209622000389> , doi:https://doi.org/10.1016/j.vehcom.2022.100491.

6 **Hu, G., Zhong, J., Wei, G.**, 2023. Sachba\_pdn: Modified honey badger algorithm with multi-strategy for uav path planning. *Expert Systems with Applications* 223, P.119941. URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0957417423004426>, doi:https://doi.org/10.1016/j.eswa.2023.119941.

7 **Liang, J., Qin, A., Suganthan, P., Baskar, S.**, 2006. Comprehensive learning particle swarm optimizer for global optimization of multimodal functions. *IEEE Transactions on Evolutionary Computation* 10, 281–295. doi:10.1109/TEVC.2005.857610.

8 **Liu, X., Chai, Z.Y., Li, Y.L., Cheng, Y.Y., Zeng, Y.**, 2023. Multiobjective deep reinforcement learning for computation offloading in uav-assisted multi-access edge computing. *Information Sciences* 642, 119154. URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0020025523007399>, doi:https://doi.org/10.1016/j.ins.2023.119154.

9 **Poudel, S., Moh, S.**, 2023. Priority-aware task assignment and path planning for efficient and load-balanced multi-uav operation. *Vehicular Communications* 42, 100633. URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2214209623000633> , doi:https://doi.org/10.1016/j.vehcom.2023.100633.

10 **Wu, Y., Fan, W., Yang, W., Sun, X., Guan, X.**, 2020. Robust trajectory and communication design for multi-uav enabled wireless networks in the presence of jammers. *IEEE Access* 8, pp. 2893–2905. URL: <https://api.semanticscholar.org/CorpusID:210695465>.

11 **Xu, L., Cao, X., Du, W., Li, Y.**, 2023. Cooperative path planning optimization for multiple uavs with communication constraints. *Knowledge-Based Systems* 260, 110164. URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0950705122012606>, doi: <https://doi.org/10.1016/j.knosys.2022.110164> .

12 **Zeng, Y., Xu, X., Jin, S., Zhang, R.**, 2021. Simultaneous navigation and radio mapping for cellular-connected uav with deep reinforcement learning. *IEEE Transactions on Wireless Communications* 20, 4205–4220. doi:10.1109/TWC.2021.3056573

13 **Walker, O., Vanegas, F., Gonzalez, F., Koenig, S.**, 2019. A deep reinforcement learning framework for uav navigation in indoor environments. 2019 IEEE Aerospace Conference, P.1–14, URL: <https://api.semanticscholar.org/CorpusID:182107388>

14 **Liu, Z., Sengupta, R., Kurzhanskiy, A.**, 2017. A power consumption model for multi-rotor small unmanned aircraft systems, in: 2017 International Conference on Unmanned Aircraft Systems (ICUAS), P. 310–315. doi:10.1109/ICUAS.2017.7991310.

15 **Bayerlein, H., Theile, M., Caccamo, M., Gesbert, D.**, 2020. Multiuav path planning for wireless data harvesting with deep reinforcement learning. *IEEE Open Journal of the Communications Society* 2, pp. 1171–1187.

16 **Dutta, S., Bansal, P.**, 2023. Behavior of parachute under varying inflight condition – a review. *Research Journal of Textile and Apparel ahead-of-print.*, pp. 699-715 URL: <https://doi.org/10.1108/RJTA-06-2022-0063>

17 **Josy John et al**, An Efficient Approach With Dynamic Multiswarm of UAVs for Forest Firefighting, *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics:Systems(2024)*. P.2860-2871, DOI: [10.1109/TSMC.2024.3352660](https://doi.org/10.1109/TSMC.2024.3352660)

Поступило в редакцию 13.02.25

Поступило с исправлениями 04.03.25

Принято в печать 10.03.25

З. А. Қутпанова<sup>1</sup>, Д.О.Кожакметова<sup>2</sup>, Д. Н. Шандронов<sup>3</sup>, Г. Н. Байсейтов<sup>4</sup>,  
\*Е. А. Оспанов.<sup>5</sup>

<sup>1</sup>Astana IT University, Республика Казахстан, г. Астана

<sup>2,5</sup>Университет Шакарима, Республика Казахстан, г. Семей,

<sup>3</sup>Института военно-инженерных работ по радиоэлектронике и связи,  
Республика Казахстан, г. Алматы

<sup>4</sup>Научно-исследовательский центр «Казахстан Инжиниринг»

LLP, Республика Казахстан, г. Астана

13.02.25 ж. баспаға түсті.

04.03.25 ж. түзетулерімен түсті.

10.03.25 ж. басып шығаруға қабылданды.

## ТӨТЕНШЕ ЖАҒДАЙДА ҰШҚЫШСЫЗ ҰШУ АППАРАТТАРЫНА АРНАЛҒАН МАРШРУТТАРДЫ ЖОСПАРЛАУДЫҢ ИННОВАЦИЯЛЫҚ ӘДІСТЕРІ

Көптеген ұшқышсыз ұшу аппараттарын (ҰҰА) пайдалану әсер сілкінісі, су тасқыны, көшкін, дала өрттері және пандемия сияқты табиғи апаттарға ұшыраған аймақтарға алғашқы медициналық көмек пен қажетті материалдарды тиімді жеткізуге мүмкіндік береді. Мұндай жағдайларда дрондарды пайдалану қалпына келтіру жұмыстарын жеделдетуге және экономикалық шығындарды азайтуға көмектесудің маңыздылығын дәлелдеді. Ұшқышсыз ұшу аппараттары (ұшқышсыз ұшу аппараттары) құстармен және басқа заттармен, әсіресе желімен қамтылмаған аймақтарда соқтығысу қаупіне тап болады. Табиғи апаттар кезінде батарея қуаты сияқты шектеулі ресурстарды ескере отырып, Алғашқы медициналық көмек уақтылы жеткізілуін қамтамасыз ету маңызды. Ол үшін жеткізу нүктелерін қамтуды, қону дәлдігін және ұшқышсыз ұшу қауіпсіздігін теңестіру қажет. Deep Q-network (DQN) модельдері маршруттарды жоспарлау үшін кеңінен қолданылады, бірақ бұрын кооперативті емес сценарийлерді сирек қарастырған. Мақалада құстар мен күтпеген кедергілер сияқты тәуекелдерді ескеретін жаңа DQN құрылымы ұсынылған. Сондай-ақ, жеткізілім мен қауіпсіз қонуды жақсарту үшін бірегей сыйақы жүйесі құрылады. Модельдеу бірнеше ұшқышсыз ұшу аппараттарын пайдалану апат кезінде алғашқы медициналық көмек көрсетуді тиімді қамтамасыз ете алатынын көрсетті.

Кілтті сөздер: Ұшқышсыз ұшу аппараттары, бірнеше ұшқышсыз ұшу аппараттары, күшейтілген оқыту, терең Q-оқыту.

Z. A. Kutpanova<sup>1</sup>, D. O. Kozhakhmetova<sup>2</sup>, D. Shandronov<sup>3</sup>, G. Baiseitov<sup>4</sup>,  
\*Y. A. Ospanov<sup>5</sup>

<sup>1</sup>Astana IT University, Republic of Kazakhstan, Astana

<sup>2,5</sup>Shakarim University, Republic of Kazakhstan, Semei

<sup>3</sup>Military Engineering Institute of Radio Electronics and Communications,  
Republic of Kazakhstan, Almaty

<sup>4</sup>R&D Center «Kazakhstan Engineering», Republic of Kazakhstan. Astana,

Received 13.02.25

Received in revised form 04.03.25

Accepted for publication 10.03.25

## INNOVATIVE METHODS OF PLANNING ROUTES FOR DRONES IN EMERGENCY SITUATIONS

*The use of multiple unmanned aerial vehicles (UAVs) makes it possible to efficiently deliver first aid and necessary supplies to areas affected by natural disasters such as earthquakes, floods, landslides, forest fires and pandemics. The use of drones in such situations has proven to be important, helping to speed up recovery efforts and minimize economic losses. Unmanned aerial vehicles (UAVs) face the risk of collisions with birds and other objects, especially in areas without network coverage. In natural disasters, it is important to ensure timely delivery of first aid, given limited resources such as battery power. To do this, you need to balance the coverage of the delivery points, the accuracy of landing and the safety of the UAV flight. Deep Q-network (DQN) models are widely used for route planning, but previously they rarely took into account non-operational scenarios. The article proposes a new DQN structure that takes into account risks such as birds and unexpected obstacles. A unique reward system is also being created to improve delivery coverage and secure landings. Modeling has shown that the use of multiple UAVs can effectively ensure the delivery of first aid in a disaster.*

*Keywords: Unmanned aerial vehicles, multi-UAVs, reinforcement learning, deep Q-learning.*

<https://doi.org/>

**V. P. Markovsky<sup>1</sup>, I. V. Koshkin<sup>2</sup>, A. B. Utegulov<sup>3</sup>,  
\*A. I. Uspanova<sup>4</sup>, S. D. Pushkarev<sup>5</sup>**

<sup>1</sup>Toraighyrov University, Republic of Kazakhstan, Pavlodar

<sup>2,4,5</sup>Akhmet Baitursynuly Kostanay Regional University,  
Republic of Kazakhstan, Kostanai

<sup>3</sup>L. N. Gumilyov Eurasian National University Republic of Kazakhstan, Astana

<sup>1</sup>ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-8519-7679>

<sup>2</sup>ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-8637-3665>

<sup>3</sup>ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-3818-3781>

<sup>4</sup>ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-3484-8750>

<sup>5</sup>ORCID: <https://orcid.org/0009-0003-2888-2228>

\*e-mail: [Kamorrasweet1@gmail.com](mailto:Kamorrasweet1@gmail.com)

## **FEASIBILITY OF USING PRODUCTION WASTE AT A MACHINE-BUILDING ENTERPRISE FOR ENERGY PRODUCTION**

*The article provides an analysis of the need and prospects for introducing elements of the zero-waste production concept to ensure sustainability of mechanical engineering enterprises and reduce the negative impact on the environment through waste recycling for energy production. The main types of waste in the mechanical engineering industry of Kostanay region enterprises, methods of their disposal and management are studied using the example of JSC Agromashholding KZ. Using the developed algorithm by the method of statistical sequential analysis, an assessment of the possibility of using mechanical engineering waste as secondary raw materials for generating electricity with the installation of its own mini-CHP is carried out. Analytical and experimental studies are carried out using the sequential analysis method, which allows in practice to take into account the capabilities of an engineering organization in handling production waste and reduce the labor intensity of production by several times. The prospects of using sequential analysis in assessing the possibility of using waste to generate energy are confirmed with satisfactory accuracy. An integrated approach to waste management is proposed, taking into account environmental, economic and social factors, which*

*allows using waste as fuel and reducing energy costs. The obtained results can be used by mechanical engineering enterprises to form an effective abandoned production cycle.*

*Key words: combined heat and power plant, waste, electric power, mechanical engineering, secondary energy resources, boiler, steam turbine, turbogenerator*

### **Introduction**

The problem of using production waste at enterprises in the mechanical engineering industry is becoming increasingly important in several key areas, each of which plays an important role in modern production and management. Production waste is a valuable resource that can be recycled and reused in its various forms [1, p. 18-23].

The mechanical engineering industry is currently one of the major sources of industrial waste. As of October 1, 2024, there are 32 enterprises operating in the mechanical engineering industry in the Kostanay region, including 29 small and medium-sized production facilities (a branch of «Rostselmash» LLC, Kostanay «Agromekhanichesky Zavod» LLC (production of spare parts for agricultural machinery), «Kostanay Tractor Plant» LLC, «Kompozit Group Kazakhstan» LLC (production of tractors), «Don Mar» LLC (production of trailed shaft reapers)), and 3 large enterprises (“SaryarkaAvtoProm” LLC (car production), «AgromashHolding KZ» JSC (production of engine components, assembly of combines and tractors, production of spare parts for agricultural machinery) and «KamLitKZ» LLC (production of components for trucks)), employing more than 3.5 thousand people.

Thus, the problem of using production waste at mechanical engineering enterprises is relevant. It affects economic, environmental, legislative, social and technological aspects. The introduction of innovative waste recycling methods and compliance with environmental standards are key factors for the successful operation of modern mechanical engineering enterprises [1, p.124-136]. The purpose of the study is to analyze and develop a method for an integrated approach to using production waste at mechanical engineering enterprises in Kostanay region by converting waste into energy.

### **Materials and methods**

To study the problem, the method of statistical sequential analysis was used, which involves a sequential selection of factors for studying the problem of mechanical engineering waste, the choice of a method for efficient waste processing and subsequent technical and economic analysis [1, p. 202-218].

The algorithm of the method for the efficient use of mini-CHP involves the following sequential actions:

1 Determining the energy needs of a mechanical engineering enterprise (or site).

2 Selecting an energy source.

3 Designing a thermal mini-power plant.

4 Operation and maintenance of the power plant, integration with the power supply network.

5 Using waste.

6 Feasibility study.

An analysis of the composition of waste was carried out using the example of the mechanical engineering enterprise JSC «Agromashholding KZ» (Fig.1):

1.829 tons of waste are generated in the form of various oils.

0.906 tons of waste are packaging waste, absorbents, wiping cloths, filter materials and protective clothing not otherwise specified.

0.138 tons of waste are generated as a result of the production, processing, distribution and use (pores) of coatings (paints, varnishes and enamels), printing inks, adhesives and sealants.

0.098 tons of waste are generated as a result of dismantling decommissioned vehicles and their maintenance.

127 tons of waste are municipal waste.

3.5 tons of metal waste.

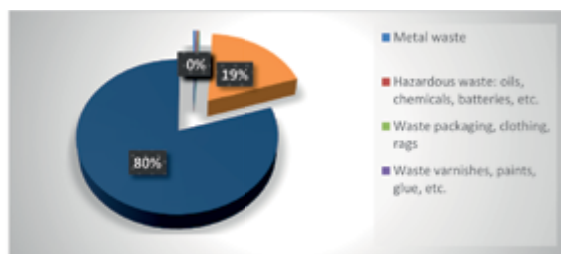


Figure 1 – Annual share of waste produced by JSC «Agromashholding KZ»

The total amount of metal waste is generated during mechanical processing and varies depending on the volume of metals and alloys to be processed. About 25 % of the metal becomes an irretrievable loss due to corrosion or friction. The rest is used in foundry production. It is also necessary to take into account the presence of wood waste that does not undergo the disposal or recycling procedure at the enterprise. In 2023, their volume at JSC «Agromashholding KZ» amounted to 535 tons.

In 2023, hazardous waste in the amount of 6.28 tons, excluding municipal waste, was transferred to a specialized enterprise TOO «Waste Recycling Factory» for the purpose of processing. Municipal waste in the amount of 127 tons was transferred to TOO «TAZALYK-2012» for the purpose of disposal. Figure 2 shows the proportion of waste content depending on the method of their disposal. Thus, it is clear that 95 % of waste is not recycled and is sent to the Kostanay landfill, which entails negative consequences for both the environment and the life and health of people, and 5% of waste is transferred to TOO «Waste Recycling Factory» for recycling.



Figure 2 – Distribution of waste of JSC «Agromashholding KZ» by method of disposal

To reduce the negative impact on the environment, it is advisable to increase the share of waste that can be recycled directly at the enterprise, and one of the promising methods for increasing sustainability is the reuse of waste as raw material for energy production [2, p.242–250].

Modern scientific research and technology seek to create production models that minimize production waste and maximize the use of available resources, improving the environmental and social situation of business and stimulating economic and sustainable development. The main principles of creating waste-free production include the integrated use of raw materials, the development of fundamentally new and improvement of existing technologies, the creation of closed water and gas cycles, cooperation of enterprises and the formation of territorial production complexes [3, p.151–157; 4, p. 106–108]. Many scientific and technological approaches are aimed at minimizing production waste and increasing the efficiency of natural resource use [4, p. 18–36].

To date, three methods of utilization and thermal disposal of industrial waste have become the most widespread in world practice and in Kazakhstan:

layered combustion of unprepared, initial waste in waste incineration boilers [5, p. 106-108];

chamber or layered combustion of enriched waste, purified from ballast components and having a stable fractional composition in cement kilns or in boiler furnaces [6, p. 12-18] ;

pyrolysis of waste, both enriched (pre-treated) and unprepared [7, p. 129-134].

In Kazakhstan, the method of recycling and processing industrial waste using pyrolysis remains little known due to its high cost. However, enterprises specializing in the processing of industrial waste using pyrolysis successfully operate in developed countries such as the United States, Denmark, Japan, Germany and others [8, p.347]. During this time, the process of obtaining energy and heat by pyrolysis from rubber, plastic and other combustible waste has acquired great importance as an important source of energy resources [9, p.394-397].

Taking into account all of the above, it is proposed to implement mini-CHP technology, which allows for the disposal of waste and the conversion of combustion energy to generate electricity and heat. In addition, to ensure the environmental safety of the facility, it is necessary to implement a multi-stage system for cleaning flue gas and disposing of unburned waste, since stations operating on gas and coal are required to pay quotas for CO2 emissions, [10, p.89-92; 11, p. 1-2] while for mini-CHPs on solid household or industrial waste, this is not required.

### Results and discussion

To implement the introduction of mini-CHP at mechanical engineering enterprises, an algorithm has been developed using the method of statistical sequential analysis for the creation and use of an in-house thermal power plant for converting waste into energy.

To determine the amount of energy released during the combustion of 127 tons of various household waste at the enterprise, including paper, plastic, cardboard and other materials, average values of the heat of combustion for these materials were used, with the assumption that the actual amount of energy may vary depending on the exact composition of the waste and its degree of moisture. With known average values of the heat of combustion of waste materials, and the proportion of waste from 127 tons: paper - 40%; textile - 40% and cardboard -20% and wood 100%, calculated by the expression:

$$Q = (m_{paper} \cdot q_{paper}) + (m_{Textile} \cdot q_{Textil cardboard}) + (m_{wood} \cdot q_{wood}) \quad (1)$$

where: Q – amount of energy, MJ,  
m- mass of the primary fuel source, kg,  
q- heat of combustion of the fuel source, kW·h/t.

Approximately 127 tons of various municipal waste and 535 tons of wood waste, burned with high efficiency, can release approximately 3,395,560 kWh (or (12,228,040 MJ) of energy, which will allow the generation of up to 68,000 kW of electrical energy. The results of the analysis performed are shown in Table 1.

To implement the next stage of the algorithm for studying the efficiency of implementing a mini-CHP using the method of statistical sequential analysis, the operating principle of the power plant was considered and a technological scheme of the installation was developed.

Table 1 – Amount of thermal energy released during pyrolysis of enterprise waste

№	Type of waste	q	m	Q
		kW·h/ton	ton	kW·h/ton
1	Paper	8700	50.8	441960
2	Textile	6400	50.8	325120
3	Cardboard and other household waste	8700	25.4	220980
4	Wood	4500	535	2407500
<b>Total:</b>			662	3395560

The developed structural and technological scheme of the mini-CHP assumes the presence of basic elements and blocks, their functions, principles of operation of the units and interaction with each other [12, p356-358]. The technological scheme of the mini-CHP is provided in Fig. 3.



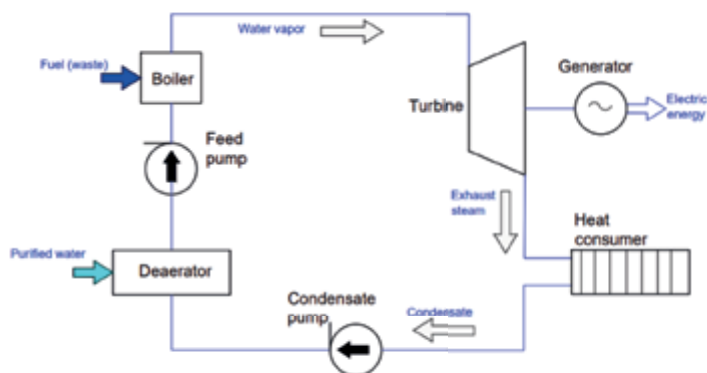


Figure 3 – Structural and technological scheme of a mini-CHP

The main elements of a thermal mini-CHP are:

**Boiler unit (boilers):** a device where pyrolysis of fuel (waste) occurs to heat water and then convert it into steam.

**Turbines:** steam obtained from boilers hits turbine blades, which rotate under its influence and sets the generator in motion.

**Generators:** convert mechanical energy obtained from the rotation of turbines into electrical energy.

**Condensers:** after leaving the turbine, the temperature of the steam in the condenser unit is reduced, after which it condenses back into a liquid state.

**Emitted gas purification system.** Allows for the purification of gases emitted during the waste pyrolysis process.

To justify the selected equipment, it is necessary to conduct a number of studies in the future:

Analysis of the thermal balance of the mini-CHP with the determination of the thermal power that will be generated and consumed during operation.

Selection of electrical equipment according to the relevant required characteristics.

Analysis and selection of boiler equipment, including boilers, turbines and other components for steam production.

Research of energy efficiency and environmental friendliness of the elements of the mini-CHP system.

With the known data on the annual volume of waste (solid municipal and wood), which is 662 tons, the amount of waste that can be used only on working days during the year was determined. It was assumed that there are about 260-

261 working days in a year, and calculations were made using the expression (tons / day).

$$V_d = \frac{N_{\text{general}}}{N_{\text{work}}},$$

$$V_d = \frac{662}{260} \approx 2,54 \quad (2)$$

Where:  $N_{\text{general}}$  – number of working days per year, days

$N_{\text{work}}$  – total amount of waste per year, tons

Assuming an annual waste supply of 662 tons, approximately 2.54 tons of waste can be used per day during a working year. The formula (kg/hour) is used to determine the amount of waste that can be used per hour, assuming an 8-hour working day.

$$V_{\text{hour}} = \frac{V_d}{N_{\text{wd}}} \quad (3)$$

$$V_{\text{hour}} = \frac{2,54}{8} = 0,3175 \text{ tons/hour} = 317,5 \text{ kg/hour}$$

where:  $V_{\text{hour}}$  – amount of waste per hour, tons

$N_{\text{wd}}$  – Number of hours in a working day, hour

Research shows that for every hour of operation, approximately 317.5 kilograms of waste can be effectively used, which is approximately 1680 kWh (6048 MJ).

Based on the provided data, the proposed boiler model “KE 2.5-140” for operation on wood and solid waste is capable of burning up to 360 kg of waste per hour with the required volumes of 317.5 kg of waste combustion per hour. Thus, one boiler will allow burning about 2540 kilograms of waste during an eight-hour working day, which is approximately equal to 13439 kWh (48380 MJ) of thermal energy daily. At the same time, the technological characteristics of the coolant are observed: Steam pressure - up to 1.3 MPa, steam temperature - 1940C.

The selection of a turbogenerator unit is carried out according to the calculated capacity of the turbogenerator based on the calculated mass of steam, reliability conditions, efficiency, rotation speed, permissible temperature and steam pressure.

The calculated mass of the released  $m_{\text{steam}}$  is determined by:

$$m_{\text{steam}} = \frac{Q_{\text{hr}}}{L_{\text{water}}} = \frac{6048 \text{ MJ}}{2,3} = 2,63 \text{ tons/hour} \quad (4)$$

where:  $Q_{\text{hr}}$  – energy released during 1 hour, MJ

$L_{\text{water}}$  – specific heat of water transformation, MJ/kg.

Based on the estimated steam mass, a steam turbogenerator model “DTEC NO.15-1.25” was selected, which consumes up to 2.7 tons of steam per hour, which in turn allows generating about 170 kW of electric power with a voltage of 380 V. This, in turn, will allow producing about 1360 kW of electric power during an eight-hour working day, and will provide uninterrupted power supply to the compressor unit “DEN-160SHM” (consumer) at the enterprise JSC “AgromashholdingKZ”. When selecting a steam turbogenerator, the required steam pressure at the inlet was taken into account, equal to 1.25 MPa, the steam pressure at the turbine outlet was 0.05 MPa, and the temperature of this steam was at least 1900C, while the previously proposed boiler “KE 2.5-140” emits up to 1.3 MPa and 1940C, respectively, which in turn meets our requirements.

The condenser unit of the scheme in Figure 3 allows for the efficient use of steam leaving the steam turbine with subsequent condensation of the exhaust steam back into liquid form. The optimal solution, according to preliminary calculation data, would be the use of a condenser that allows condensation of 5 to 800 liters of steam per minute with subsequent introduction of heat exchangers into this system.

To select a system for cleaning emitted gases, which must be installed in the mini-CHP scheme to reduce the negative impact of industrial processes on the ecosystem, the volume of  $M_{\text{sp}}$  gross emissions of solid particles in flue gases for solid and liquid fuels is calculated using the formula, tons/year

$$M_{\text{sp}} = B \cdot A_r \cdot f \cdot (1 - \eta) \\ M_{\text{sp}} = 662 \cdot 0,6 \cdot 0,005 \cdot (1 - 0) = 1,986 \quad (5)$$

where:  $B$  – fuel consumption per year, t/year,

$A_r$  – fuel ash content per working mass, %,

$\eta$  – proportion of solid particles captured in ash collectors,

$f$  –  $a_{\text{un}}/(100-G_{\text{un}})$  – ash content coefficient,

$a_{\text{ca}}$  – proportion of fuel ash in fly ash,

$G_{\text{ca}}$  – content of combustibles in fly ash (%).

The maximum one-time emission of solid particles is determined by the formula:

$$M = \frac{\text{Myr} \cdot 1000000}{(t \cdot 3600)} \\ M = \frac{1,986 \cdot 1000000}{(2080 \cdot 3600)} = 0,2652 \text{ grams/sec} \quad (6)$$

where:  $t$  – operating time of the boiler plant per year, equal to,  $t=260 \cdot 8 = 2080$  hour/year

The gross emission of carbon monoxide and nitrogen oxide for solid, liquid and gaseous fuels was calculated in a similar manner. The obtained values and the comparison result before and after filtration are presented in Fig. 4.

The studies show that the main pollutant in terms of concentration and total emission is carbon monoxide (CO), whose concentration and total emission significantly exceed the indicators of other substances. With the estimated volumes of harmful emissions and combustion of 317,0 kg. the volume of gas released during pyrolysis will be approximately 317,0 m<sup>3</sup>. As a result, the optimal solution was chosen to use the smoke filter «DGRH-K-3500,0 (U)», which combines several methods of cleaning smoke from pollutants, and allows to reduce the level of pollution by 93-98%. The total volume of emissions will be 2.0298 tons, which is 26.96592 tons less than in the absence of these filters.

The final stage is the analysis of the technical and economic feasibility of the project implementation based on the criteria for determining the costs of annual energy consumption, the costs of waste removal and disposal, the payback period and the amount of tax for the negative impact on the environment.

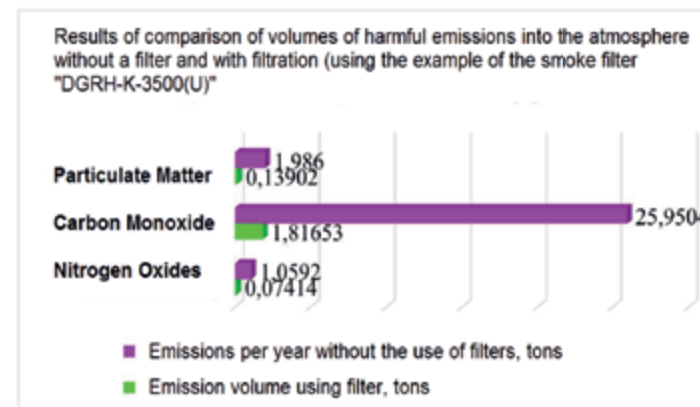


Figure 4 – Comparative analysis of the levels of harmful emissions into the atmosphere using a smoke filter

The assessment of the costs of energy consumption per day of consumers connected to the mini-CHP is formed with an assessment of the characteristics of a consumer with a capacity of 160,0 kW/hour, determined in kW:

$$\begin{aligned} P_{\text{day}} &= P_{\text{hr}} \cdot T_{\text{wd}} \\ P_{\text{day}} &= 160,0 \cdot 8 = 1280,0 \end{aligned} \quad (7)$$

where:  $P_{\text{day}}$  – power consumption during the working day, kW

$P_{\text{hr}}$  – power consumption per hour, kW/hour;

$T_{\text{wd}}$  – number of hours per shift, hour

With the estimated output of the mini-CHP of 1360 kW/h, the condition,  $P_{\text{day}} = 1280$  kW satisfies the estimated one.

The volume of consumed electricity per year is calculated similarly, which will be 332,800 kW. With the cost of one kilowatt of electricity (in the Kostanay region, the electricity tariff is 33.14 KZT / kW·h), the enterprise annually spends 12,352,471 KZT /year on power supply of the compressor unit, taking into account VAT.

The assessment of the costs of waste removal and disposal by a waste disposal company consists of the analysis of the cost of waste removal per 1m<sup>3</sup>, which amounted to 2424.612 KZT, and the cost of disposal of the same 1m<sup>3</sup> at a landfill, which is 1775.771 KZT, including VAT. When removing 127 tons of various solid municipal waste, their approximate volume is 635 m<sup>3</sup>. The cost of waste removal for 2023 amounted to 635 2424.612 = 1 539 627,35 KZT. The cost of waste disposal at the landfill for 2023 amounted to 635 1775.,77 = 1 127 613,95 KZT. The total cost of waste removal and disposal at the landfill in 2023 amounted to 2 667 241,3 KZT.

An assessment of the costs of purchasing and installing mini-CHP equipment was carried out, the results of which are shown in Fig. 5.

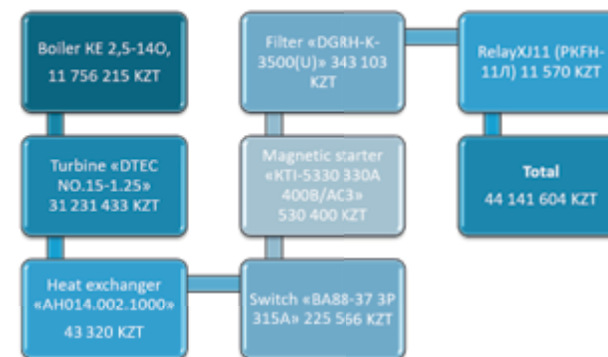


Figure 5 – Estimated cost of equipment and types of work for the installation of a mini-CHP

The payback period of the investment was determined taking into account the annual costs of waste removal and disposal, as well as energy supply for the compressor unit, and as a result, the amount of annual financial costs (net profit PP), compensated by the installation of a mini-CHP, was:

$$PP = 2\,667\,241 + 12\,352\,471 = 15\,059\,712 \text{ KZT}$$

The cost of purchasing the equipment described earlier will be, or otherwise, the investment costs of IC, amounted to 44 141 607 KZT. The estimated payback period of the project was:

$$\begin{aligned} PBP &= \frac{IC}{PP} \\ PBP &= \frac{44\,141\,607}{15\,059\,712} = 2,93 \text{ year} \end{aligned} \quad (8)$$

where: PBP – Pay-Back period,

IC – Investment Costs,

PP – Project Profit,

### Conclusions

The results of the research demonstrate that the proposed technical solutions are not only environmentally sound, but also have significant financial attractiveness with a payback period of less than 3 years. The generation of electricity by a mini-CHP on waste met the needs of a machine-building plant, using the example of JSC Agromashholding KZ, by 45-50 %, and an energy survey showed that the boiler units «KE 2.5-140» and «DTEC NO.15-1.25» have a reserve for further

efficiency improvement, reduction of carbon monoxide emissions by additional adjustment of the automatic control system of the filtration device. The energy use of waste in boiler units as part of a mini-CHP is a relevant and promising area for both the Kostanay region and the Republic of Kazakhstan.

## REFERENCES

1 **Van Ewijk, S. and Stegemann, J.A.** An Introduction to Waste Management and Circular Economy. London: UCL Press [Text] //University College London, 2023. – P.409 (ISBN: 978-1-80008-466-7 (Pbk.). – DOI: <https://doi.org/10.14324/111.9781800084650> )

2 Piana Papamichael, Irene Voukkali, Marinos Stylianou, Antonis A. Zorpas, Rahul Baidya, Sadhan Kumar Ghosh. Chapter 12 – Concept of waste-to-energy strategies [Text] // Advances in Biofuels Production, Optimization and Applications, 2024, Pages 241-267. – DOI: <https://doi.org/10.1016/B978-0-323-95076-3.00002-8>

3 **Нашенкина, М. С., Чернов, В. Ю.** Перспективы использования древесных отходов в качестве источников энергии [Текст] // Энигма, 2020. – Т. 17-2. – С. 155-159.

4 **Lavaee, M. S.** Waste to energy (WTE): Conventional and plasma-assisted gasification – experimental and modeling studies. A thesis. Waterloo, ON: University of Waterloo, 2013. – P.123. URL: [https://uwspace.uwaterloo.ca/bitstream/handle/10012/7461/Lavaee\\_Mohammad.pdf?sequence=1&isAllowed=y](https://uwspace.uwaterloo.ca/bitstream/handle/10012/7461/Lavaee_Mohammad.pdf?sequence=1&isAllowed=y) (date of access: 04.06.2024).

5 **Трубаев, П.А., Щекин, И.И., Корнилова, Н.В., Гришко, Б.М.** Особенности сжигания отходов с получением энергии [Текст] // Сборник научных трудов конференции «Высокие технологии и инновации». – Белгородский государственный технологический университет имени В.Г. Шухова, 2016. – С. 105-109.

6 **Сергеенков, А.П.** Мировые тенденции реализации концепции «Отходы – в энергию» [Текст] // журнал Твердые бытовые отходы. – № 11 (101). – Москва, 2014. – С. 46.

7 Faheem Muhammad, Azher Hassan, Muhammad Du Jiangkun., Wang Bing Harnessing potential of smart and conventional spent adsorbents: Global practices and sustainable approaches through regeneration and tailored recycling [Text] // Separation and Purification Technology. – Volume 354, Part 3. – 2025. – № 128907.- ISSN 13835866, DOI: <https://doi.org/10.1016/j.seppur.2024.128907>

8 Divya Bisen, Ashish Pratap Singh Chouhan, Manish Pant, Sankar Chakma Advancement of thermochemical conversion and the potential of biomasses for

production of clean energy: A review [Text] //Renewable and Sustainable Energy Reviews. – Vol.20, 2025. – Article 115016. – ISSN 1364032. – DOI: <https://doi.org/10.1016/j.rser.2024.115016>

9 **Вебер Я. И., Серебрякова А. А., Лазуткина Ю. С.** Перспективы переработки твердых коммунальных отходов на территории Алтайского края // Алтайский государственный технический университет им. И. И. Ползунова. – Барнаул: АЛТГТУ. - 2023. - № 1. - С. 392-394. - URL: [https://journal.altstu.ru/konf\\_2023/2023\\_1/122/](https://journal.altstu.ru/konf_2023/2023_1/122/)

10 **Исламова С. И., Мухамедшина Э. И.** Технологии переработки, утилизации и получения энергии из твердых бытовых отходов [Текст] // Труды Академэнерго. 2012;(4): С. 88–96.

11 **Калитеевский, М. А., Чечурин, Л. С.** Установка для утилизации отходов и получения энергии [Текст] // Патент на изобретение RU 2723816 С1. – 17.06.2020.

12 **Пагрушева, Т. Н., Петров, С. К., Магвеев, П. В., Борцова, С. С.** Пиролиз как перспективное направление переработки пластиковых отходов для получения энергии [Текст] // Химическая технология, 2021. – Т. 22. – № 8. – С. 355-359.

## REFERENCES

1 **Van Ewijk, S. and Stegemann, J.A.** An Introduction to Waste Management and Circular Economy. London: UCL Press [Text] //University College London, 2023. – P. 409 (ISBN: 978-1-80008-466-7 (Pbk.). – DOI: <https://doi.org/10.14324/111.9781800084650> )

2 Piana Papamichael, Irene Voukkali, Marinos Stylianou, Antonis A. Zorpas, Rahul Baidya, Sadhan Kumar Ghosh. Chapter 12 -Concept of waste-to-energy strategies [Text] // Advances in Biofuels Production, Optimization and Applications, 2024, P. 241-267. – DOI: <https://doi.org/10.1016/B978-0-323-95076-3.00002-8>

3 **Nashenkina, M. S., Chernov, V. YU.** Perspektivy ispol'zovaniya drevesnyh othodov v kachestve istochnikov energii [Prospects for using wood waste as energy sources] // Enigma, 2020. – V. 17-2. – P. 155-159.

4 **Lavaee, M. S.** Waste to energy (WTE): Conventional and plasma-assisted gasification — experimental and modeling studies. A thesis. Waterloo, ON: University of Waterloo, 2013. – P.123. URL: [https://uwspace.uwaterloo.ca/bitstream/handle/10012/7461/Lavaee\\_Mohammad.pdf?sequence=1&isAllowed=y](https://uwspace.uwaterloo.ca/bitstream/handle/10012/7461/Lavaee_Mohammad.pdf?sequence=1&isAllowed=y) (date of access: 04.06.2024).

5 **Trubaev, P.A., Shchekin, I.I., Kornilova, N.V., Grishko, B.M.** Osobennosti szhiganiya othodov s polucheniem energii [Features of waste incineration with energy production] // Sbornik nauchnyh trudov konferencii «Vysokie tekhnologii

i innovacii». – Belgorodskij gosudarstvennyj tekhnologičeskij universitet imeni V.G. SHuhova, 2016. – P. 105-109.

6 **Sergeenkov, A. P.** Mirovye tendencii realizacii koncepcii «Othody – v energiyu» [Global trends in the implementation of the concept «Waste - into energy»] // zhurnal Tverdye bytovye othody. – № 11 (101). – Moskva, 2014. – P. 46.

7 Faheem Muhammad, Azher Hassan, Muhammad Du Jiangkun., Wang Bing Harnessing potential of smart and conventional spent adsorbents: Global practices and sustainable approaches through regeneration and tailored recycling [Text] // Separation and Purification Technology. – Volume 354, Part 3. -2025. – № 128907.- ISSN 13835866, DOI: DOI: <https://doi.org/10.1016/j.seppur.2024.128907>

8 Divya Bisen, Ashish Pratap Singh Chouhan, Manish Pant, Sankar Chakma Advancement of thermochemical conversion and the potential of biomasses for production of clean energy: A review [Text] //Renewable and Sustainable Energy Reviews. – Vol.20, 2025. – Article 115016. – ISSN 1364032. – DOI: <https://doi.org/10.1016/j.rser.2024.115016>

9 **Veber YA. I., Serebryakova A. A., Lazutkina YU. S.** Perspektivy pererabotki tverdyh kommunal'nyh othodov na territorii Altajskogo kraja [Prospects for processing solid municipal waste in the Altai Territory] // Altajskij gosudarstvennyj tekhnicheskij universitet im. I. I. Polzunova. – Barnaul : AltGTU. – 2023. – V.№ 1. – P. 392-394. – URL: [https://journal.altstu.ru/konf\\_2023/2023\\_1/122/](https://journal.altstu.ru/konf_2023/2023_1/122/)

10 **Islamova S.I., Muhamedshina E.I.** Tekhnologii pererabotki, utilizacii i polucheniya energii iz tverdyh bytovyh othodov [Technologies for processing, recycling and energy production from solid municipal waste] // Trudy Akademenergo. 2012;(4): P.88–96.

11 **Kaliteevskij, M.A., Chechurin, L.S.** Ustanovka dlya utilizacii othodov i polucheniya energii [Waste disposal and energy recovery plant] // Patent na izobrenie RU 2723816 C1. – 17.06.2020.

12 **Patrusheva, T.N., Petrov, S.K., Matveev, P.V., Borcova, S.S.** Piroлиз kak perspektivnoe napravlenie pererabotki plastikovyh othodov dlya polucheniya energii [Pyrolysis as a promising direction for processing plastic waste for energy production] // Himicheskaya tekhnologiya, 2021. – V. 22. – № 8. – P. 355–359.

Received 24.12.24

Received in revised form 22.01.25

Accepted for publication 10.03.25

*В. П. Марковский<sup>1</sup>, И. В. Кошкин<sup>2</sup>, А. Б. Утегулов<sup>3</sup>, \*А. И. Успанова<sup>4</sup>, С. Д. Пушкарев<sup>5</sup>*

<sup>1</sup>Торайғыров университеті, Қазақстан Республикасы, Павлодар қ.

<sup>2,4,5</sup>А. Байтұрсынұлы атындағы Қостанай өңірлік университеті, Қазақстан Республикасы, Қостанай қ.

<sup>3</sup>Л. Н. Гумилев атындағы Еуразия ұлттық университеті, Қазақстан Республикасы, Астана қ.

24.12.24 ж. баспаға түсті.

22.01.25 ж. түзетулерімен түсті.

10.03.25 ж. басып шығаруға қабылданды.

## ЭНЕРГИЯ ӨНДІРУ ҮШІН МАШИНА ҚҰРАСТЫРУ КӘСІПОРЫНДА ӨНДІРІС ҚАЛДЫҚТАРЫН ПАЙДАЛАНУ МҮМКІНДІГІ

*Мақалада машина жасау кәсіпорындарының тұрақтылығын қамтамасыз ету және энергия өндіру мақсатында қалдықтарды қайта өңдеу арқылы қоршаған ортаға теріс әсерді азайту үшін қалдықсыз өндіріс концепциясының элементтерін енгізу қажеттілігі мен перспективаларына талдау жасалған. Қостанай облысындағы кәсіпорындардың машина жасау өнеркәсібіндегі қалдықтардың негізгі түрлері, оларды кәдеге жарату және басқару әдістері «Агромашинохолдинг КЗ» АҚ мысалында зерттелген. Өзірленген алгоритмді және статистикалық дәйекті талдау әдісін қолдана отырып, жеке шағын ЖЭО орнату арқылы машина жасау қалдықтарын электр энергиясын өндіру үшін қайталама шикізат ретінде пайдалану мүмкіндігіне баға берілді. Аналитикалық және тәжірибелік зерттеулер тізбекті талдау әдісін қолдану арқылы жүргізілді, бұл тәжірибеде өндіріс қалдықтарымен жұмыс істеуде машина жасау ұйымының мүмкіндіктерін есепке алуға және өндірістің еңбек сыйымдылығын бірнеше есе төмендетуге мүмкіндік береді. Қалдықтарды энергия өндіру үшін пайдалану мүмкіндігін бағалауда дәйекті талдауды қолданудың әлеуеті қанағаттанарлық дәлдікпен расталды. Экологиялық, экономикалық және әлеуметтік факторларды ескере отырып, өндіріс қалдықтарын басқарудың кешенді тәсілі ұсынылады, бұл қалдықтарды отын ретінде пайдалануға мүмкіндік береді және энергия шығындарын азайтады. Алынған нәтижелерді машина жасау кәсіпорындары тиімді қалдырылған өндірістік циклды қалыптастыру үшін пайдалана алады.*

*Кілтті сөздер: жылу электр станциясы, қалдықтар, электр энергиясы, машина жасау, екінші энергия ресурстары, қазандық, бу турбинасы, турбогенератор.*

*В. П. Марковский<sup>1</sup>, И. В. Кошкин<sup>2</sup>, А.Б. Утегулов<sup>3</sup>, \*А. И. Успанова<sup>4</sup>, С. Д. Пушкарев<sup>5</sup>*

<sup>1</sup>Торайғыров университет, Республика Казахстан, г. Павлодар.

<sup>2,4,5</sup>Костанайский региональный университет имени Ахмета Байтұрсынұлы, Республика Казахстан, г. Костанай.

<sup>3</sup>Евразийский национальный университет имени Л. Н. Гумилева, Республика Казахстан, г. Астана.

Поступило в редакцию 24.12.24

Поступило с исправлениями 22.01.25

Принято в печать 10.03.25

## **ЦЕЛЕСООБРАЗНОСТЬ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ ОТХОДОВ ПРОИЗВОДСТВА НА МАШИНОСТРОИТЕЛЬНОМ ПРЕДПРИЯТИИ ДЛЯ ПРОИЗВОДСТВА ЭНЕРГИИ**

*В статье приведен анализ необходимости и перспектив внедрения элементов концепции безотходного производства для обеспечения устойчивости предприятий машиностроения, и снижения негативного воздействия на окружающую среду за счет вторичной переработки отходов с целью получения энергии. Исследованы основные виды отходов в отрасли машиностроения предприятий Костанайской области, способы их утилизации и управления на примере АО «Агромашхолдинг KZ». С использованием разработанного алгоритма методом статистического последовательного анализа, проведена оценка возможности использования отходов машиностроения в качестве вторичного сырья для выработки электроэнергии с установкой собственной мини-ТЭЦ. Проведены аналитические и экспериментальные исследования с помощью метода последовательного анализа, который позволяет на практике учитывать возможности машиностроительной организации в обращении с отходами производства и сокращать трудоемкость выпуска продукции в несколько раз. Перспективность применения последовательного анализа в оценке возможности использования отходов для выработки энергии, подтверждается с удовлетворительной точностью. Предложен комплексный подход*

*к управлению отходами производства с учетом экологических, экономических и социальных факторов, что позволяет использовать отходы в качестве топлива и снизить затраты на энергоносители. Полученные результаты могут быть использованы предприятиями машиностроения для формирования эффективного замкнутого цикла производства.*

*Ключевые слова: теплоэлектроцентраль, отходы, электроэнергия, машиностроение, вторичные энергоресурсы, котел, паровая турбина, турбогенератор.*

<https://doi.org/>

**А. Н. Новожилов<sup>1</sup>, \*А. Е. Анарбаев<sup>2</sup>, Т. А. Новожилов<sup>3</sup>**

<sup>1,2</sup>Торайғыров университет, Республика Казахстан, г. Павлодар

<sup>3</sup>Омский Государственный Технический Университет,

Российская Федерация, г. Омск

<sup>1</sup>ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-7530-5034>

<sup>2</sup>ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-6890-8005>

<sup>3</sup>ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-0293-7852>

\*e-mail: [alibek\\_anarbaev@mail.ru](mailto:alibek_anarbaev@mail.ru)

## МЕТОДЫ ДИАГНОСТИКИ ПОДШИПНИКОВ КАЧЕНИЯ ГЛАВНОГО ВАЛА ВЕТРОЭНЕРГЕТИЧЕСКОЙ УСТАНОВКИ

*Во время эксплуатации ветроэнергетической установки (ВЭУ) нагрузки от лопастей приходятся на главный вал ветропривода и его подшипники. Именно это и является одной из основных причин их износа и выхода из строя. При этом размеры повреждения ВЭУ, а, следовательно, времени и стоимости ремонта зависят от используемого метода диагностики подшипников качения главного вала.*

*Как показал анализ все известные методы диагностики подшипников качения главного вала ВЭУ можно разделить на токовые, акустические и вибрационные методы, а также метод ударных импульсов. При этом выяснилось, что наиболее эффективными, надежными и хорошо зарекомендовавшими себя в диагностике ВЭУ являются многочисленные вибрационные методы.*

*В этих методах выявления повреждений в подшипниках качения главного вала осуществляется путем исследования временной, частотной, частотно-временных областей измеряемого вибрационного сигнала, получаемого тем или иным способом. Однако, как показал анализ возможностей этих методов, и они не всегда достаточно способны оценить величину износа подшипников главного вала ВЭУ. В тоже время некоторые из них могут служить основой для разработки методов в значительной степени лишенной этого недостатка.*

*Ключевые слова: Ветроэнергетическая установка, главный вал, подшипники качения, методы диагностики, вибрационные методы.*

### Введение

Выработка электрической энергии на тепловых станциях, работающих на сжигании ископаемого топлива в виде угля, нефтепродуктов или природного газа сопровождается выбросами в атмосферу твердых частиц в виде пыли, а также оксидов азота и диоксида серы. Все это вызывает негативное влияние как на здоровье людей, так на природу. При этом расходуется большое количество дорогостоящего ископаемого топлива. Одним из решений этой проблемы является использование в качестве источника энергии ветра. В связи с этим в настоящее время для выработки электроэнергии практически во всех странах стали массово использоваться ветроэнергетические установки (ВЭУ).

С 2000 по 2015 год совокупная ветровая мощность во всем мире увеличилась с 17 000 мВт до 430 000 мВт. При этом в 2015 году Китай обогнал страны Европейского союза по количеству установленных ветряных турбин и продолжает лидировать в их установке. По прогнозам экспертов в данной области если такие темпы роста сохранятся, то к 2050 году одна треть мировых потребностей в электроэнергии будет удовлетворяться за счет энергии ветра [1].

В настоящее время среди ВЭУ наиболее перспективными и широко используемыми являются те, которые используют четырехточечную кинематическую схему. Эта схема представлена на рисунке 1.

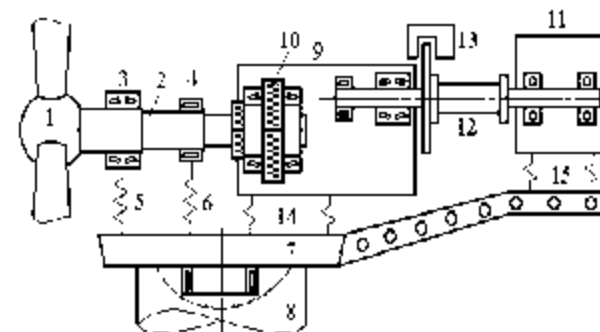


Рисунок 1 – Четырехточечная кинематическая схема ВЭУ

Из этого рисунка видно, что ветропривод 1 закрепляется на главном валу 2, который, в свою очередь, с помощью подшипников 3 и 4, а также

амортизаторов 5 и 6 устанавливается на станине 7. В свою очередь станина 7 с помощью подшипника поворота закрепляется на верхнем основании башни 8. К главному валу 2 присоединена коробка передач 9 с планетарным редуктором 10. С помощью этого редуктора осуществляется увеличения скорости вращения вала генератора 11 до величины, необходимой для номинальной работы. Генератор 11 соединяется с выходным валом коробки передач через гибкую муфту 12. Остановка вращения ветропривода 1 осуществляется с помощью тормозного диска 13 механического тормоза, имеющего гидравлический привод. Крепление коробки передач 9 и генератора 11 к станине 7 осуществляется с помощью амортизаторов 14 и 15. При такой кинематической схеме изгибающие нагрузки от ветропривода приходятся на главные подшипниками 3 и 4 [2].

Как известно ветер является величиной переменной. В процессе эксплуатации под его воздействием на лопасти возникают изгибающие моменты не только в лопастях ВЭУ, но и в его главном валу. Это, в свою очередь, сопровождается осевыми и радиальными переменными нагрузками [3], воздействующими на его подшипники. Именно это и является одной из основных причин их износа и повреждения [4]. К другим причинам износа подшипников следует отнести попадание продуктов их износа в смазочный материал [5].

#### Материалы и методы

В соответствии с [6] в настоящее время для мониторинга состояния и диагностики неисправности подшипников главного вала ВЭУ используются методы, приведенные на рисунке 2. Как из него видно эти методы делятся на пять основных групп.



Рисунок 2 – Классификация методов диагностики подшипников главного вала ВЭУ

Токовый метод. В силу конструктивных особенностей некоторые типы ВЭУ работают по методу прямого привода. В этом случае из-за неравномерной скорости ветродвигателя любые неисправности в подшипниках будут приводить к появлению в токе статора генератора высших гармоник [7].

Однако этот метод невозможно использовать для ВЭУ с редуктором. Кроме того, он может быть недостаточно чувствительным для выявления небольших дефектов или начальных стадий износа подшипников, так как при этом следует учитывать наличие гармоник тока в сети вызванных иными причинами.

Метод сопоставления. Метод сопоставления основан на измерении сигналов датчиков из нескольких источников на момент монтажа ВЭУ, и сопоставлении их с текущими показаниями датчика [8].

Недостаток метода заключается в том, что для построения надежной модели требуется большое количество данных о нормальном и дефектном состоянии подшипников. Нехватка таких данных или плохое их качество снижает точность этого метода.

Акустический метод. Этот метод основан на измерении волн энергии, генерируемых быстрым высвобождением такой энергии из локализованных источников внутри материала, когда он подвергается механическим или термическим напряжениям [9]. Типичная частота сигналов акустической эмиссии находится в пределах от 100 кГц до 1 МГц [10].

Недостатками этого метода является чувствительность к внешним факторам в виде вибрации от соседних узлов конструкции ВЭУ, шумов и перепадов температуры окружающей среды и загрязнение смазки. Для предотвращения ложной работы устройств диагностики их чувствительность приходится снижать. Что в свою очередь может привести к разрушению подшипников, сопровождающемуся возможным повреждением других элементов ВЭУ.

Метод ударных импульсов. Метод ударных импульсов основан на измерении затухающих колебаний в материале, например, станины. Эти затухающие колебания имеют высокую частоту, которая составляет порядка 32 кГц и достаточно быстро затухают [11]. Измерение этих затухающих колебаний осуществляется с помощью пьезоэлектрических преобразователей с резонансной частотой 32 кГц [12]. Он эффективно работает как полосовой фильтр, поскольку только ударные импульсы будут вызывать резонансную частоту пьезоэлектрических кристаллов.

Однако этот метод неспособен обнаруживать зарождающиеся повреждения в подшипниках на крайне низких оборотах главного вала, так как интенсивность ударных импульсов в этом случае будет трудно различимой.

Вибрационный метод. Вибрационный метод является наиболее эффективным, надежным и хорошо зарекомендовавшим себя в диагностике ВЭУ [13]. Используя анализ сигналов с вибродатчиков можно обнаружить наличие отказа или даже предстоящий отказ подшипников.



Для надёжного выявления дефектов на ранних стадиях необходимы высокочувствительные вибродатчики и соответствующее программное обеспечение. Все это требует значительных финансовых вложений.

Вибрационные методы весьма разнообразны и является мощным инструментом для диагностики ВЭУ. В соответствии с [14] эти методы можно разделить на четыре основные группы. Эти группы приведены на рисунке 3.

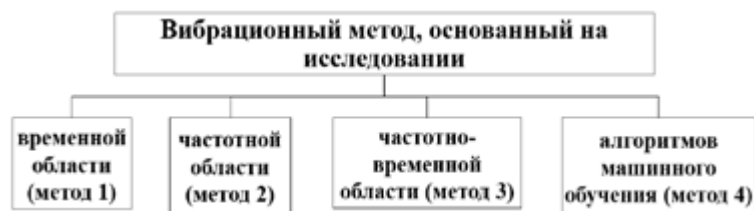


Рисунок 3 – Классификация методов диагностики подшипников главного вала ВЭУ по вибрации

Первый метод основан на исследовании временной области измеряемого сигнала. Для реализации этого метода можно воспользоваться обычным осциллографом. В этом случае по полученным осциллограммам осуществляется анализ значений сигнала вибрации непосредственно во времени без преобразования их в частотную или другую область. Такой подход позволяет улавливать быстрые изменения в динамике системы. Многообещающим для применения в ВЭУ можно считать метод внутренней декомпозиции по временной шкале [15]. Суть этого метода заключается в разложении сложного сигнала на базовую составляющую и ее высокочастотные временные компоненты.

Однако временные данные, полученные с вибродатчиков чувствительны к различным внешним факторам, которые могут значительно затруднять интерпретацию полученных результатов. При этом достаточно сложно выявить конкретные причины дефектов. Для этого требуется дополнительный анализ или переход к частотной области.

Второй метод основан на исследовании частотной области измеряемого сигнала. Он заключается в том, что поврежденные системы могут выдавать частотные характеристики, отличающиеся от тех, которые наблюдаются в нормальных условиях. При использовании этого метода вибрационный сигнал, полученный во временной области, преобразуется в частотную область с помощью, например, метода быстрого преобразования Фурье [16]. Суть этого метода заключается в представлении любого сигнала как суммы гармонических сигналов различных частот и амплитуд.

Однако этот метод также чувствителен к внешним факторам, которые могут скрывать или искажать важные частотные компоненты, связанные с неисправностями подшипников. Кроме того, для реализации метода требуется качественное оборудование в виде чувствительные акселерометры и анализаторов спектра частот.

Третий метод основан на исследовании частотно – временной области измеряемого сигнала. Этот метод позволяет выявить такие повреждения как трещины в обоймах подшипников и износ их шариков путем анализа сигналов в частотно-временной области [17]. Суть этого метода заключается в разложении сигнала с помощью вейвлет-преобразование [18] на компоненты разной частоты с привязкой к времени. Это особенно важно для анализа вибраций, при которых возникают кратковременные импульсов.

Однако в условиях высокого уровня помех выделение требуемых сигналов может быть затруднено. В связи с этим может потребоваться дополнительная фильтрация или обработка исходного сигнала. Кроме того, этот метод чувствителен к изменениям режима работы оборудования ВЭУ в виде скорости вращения главного вала или изменение нагрузки.

Четвертый метод основан на использовании алгоритмов машинного обучения при исследовании параметров измеряемого сигнала. Он совмещает обработку вибрационного сигнала с обучением моделей для прогнозирования износа подшипников. Этот метод позволяет автоматически выявлять дефекты подшипников по сигналам вибрации. То есть отпадает необходимость их ручной интерпретации [19].

Однако для реализации этого метода требуется большие объемы данных, включая данные о частотных характеристиках отдельных элементов кинематической схемы ВЭУ, которые в различных типах ВЭУ могут быть различны. При этом эти данные получаемые в процессе диагностики могут содержать помехи, вызванные воздействиями различного рода. Все это может настолько усложнить процесс диагностирования, что на практике его реализация станет невозможной.

#### Результаты и обсуждение

Технико-экономическая эффективность использования всех рассмотренных методов диагностики заключается в возможности выявления на раннем этапе износа подшипников главного вала в ВЭУ и информировании об этом обслуживающего персонала. Что позволяет своевременно выявить предельный износ подшипников, а значит уменьшить размеры повреждения элементов кинематической схемы ВЭУ, а, следовательно, сократить время и стоимость ее после аварийного ремонта.

#### Выводы

1 Как показал анализ известных методов диагностики подшипников главного вала ВЭУ наиболее эффективным и хорошо зарекомендовавшим себя методом является вибрационный метод.

2 Практически всегда реализация вибрационного метода осуществляется путем исследования получаемого сигнала во временной, частотной или частотно – временной областях. Однако не всегда эти методы позволяют достаточно точно оценить величину износа подшипников главного вала ВЭУ.

3 Разработка новых более чувствительных методов диагностики должна базироваться на совершенствовании вибрационных методов. Что позволит сократить размеры повреждений элементов кинематической схемы ВЭУ, а, следовательно, уменьшить время и стоимость ее после аварийного ремонта.

### СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

- 1 <https://www.nationalgeographic.com/environment/article/wind-power>
- 2 **M Whittle.** Wind turbine drivetrain technology and cost drivers. In Proceedings of FRENS 2012, 2012.
- 3 **Baldwin B.** Increasing bearing reliability in a main shaft support system. White Paper, Timken.
- 4 Ingrid Kovaříková, Beáta Szewczyková, Pavel Blaškovič, Erika Hodúlová, Emil Lechovič, Study and characteristic of abrasive wear mechanisms, Mater. Sci. Technol. (2009) 1335–9053.
- 5 **Ai, X.** Effect of debris contamination on the fatigue life of roller bearings (2001) Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part J: Journal of Engineering Tribology, 215 (6), P. 563-575. doi: 10.1243/1350650011543808
- 6 **Kandukuri, S.T., Klausen, A., Karimi, H.R., Robbersmyr, K.G.** A review of diagnostics and prognostics of low-speed machinery towards wind turbine farm-level health management (2016) Renewable and Sustainable Energy Reviews, 53, P. 697-708. doi: 10.1016/j.rser.2015.08.061
- 7 **Yang, W., Tavner, P.J., Wilkinson, M.R.** Condition monitoring and fault diagnosis of a wind turbine synchronous generator drive train (2009) IET Renewable Power Generation, 3 (1), pp. 1-11. doi: 10.1049/iet-rpg:20080006
- 8 **Yin, S., Ding, S.X., Xie, X., Luo, H.** A review on basic data-driven approaches for industrial process monitoring (2014) IEEE Transactions on Industrial Electronics, 61 (11), art. no. 6717991, P. 6418-6428. doi: 10.1109/TIE.2014.2301773
- 9 **Al-Dossary, S., Hamzah, R.I.R., Mba, D.** Observations of changes in acoustic emission waveform for varying seeded defect sizes in a rolling element bearing (2009) Applied Acoustics, 70 (1), P. 58-81. doi: 10.1016/j.apacoust.2008.01.005

10 **Elforjani, M., Mba, D.** Natural mechanical degradation measurements in slow speed bearings (Открытый доступ) (2009) Engineering Failure Analysis, 16 (1), P. 521-532. doi: 10.1016/j.engfailanal.2008.06.005

11 The Shock Pulse Method for Determining Condition of Anti-friction Bearings. SPM Technical Information, Sweden: SPM Instruments AB

12 **Yang, R., Kang, J., Zhao, J., Li, J., Li, H.** A case study of bearing condition monitoring using SPM (2014) Proceedings of 2014 Prognostics and System Health Management Conference, PHM 2014, art. No. 6988262, P. 695-698. doi: 10.1109/PHM.2014.6988262

13 **Lu, B., Li, Y., Wu, X., Yang, Z.** A review of recent advances in wind turbine condition monitoring and fault diagnosis (2009) 2009 IEEE Power Electronics and Machines in Wind Applications, PEMWA 2009, art. No. 5208325. doi: 10.1109/PEMWA.2009.5208325

14 **Liu, Z., Zhang, L.** A review of failure modes, condition monitoring and fault diagnosis methods for large-scale wind turbine bearings (Открытый доступ) (2020) Measurement: Journal of the International Measurement Confederation, 149, art. No. 107002. doi: 10.1016/j.measurement.2019.107002

15 **Frei, M.G., Osorio, I.** Intrinsic time-scale decomposition: Time-frequency-energy analysis and real-time filtering of non-stationary signals (2007) Proceedings of the Royal Society A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences, 463 (2078), P. 321-342. doi: 10.1098/rspa.2006.1761

16 **Arun, P., Lincon, S.A., Prabhakaran, N.** Detection and Characterization of Bearing Faults from the Frequency Domain Features of Vibration (2018) IETE Journal of Research, 64 (5), pp. 634-647. doi: 10.1080/03772063.2017.1369369

17 **Antoniadou, I., Manson, G., Staszewski, W.J., Barszcz, T., Worden, K.** A time-frequency analysis approach for condition monitoring of a wind turbine gearbox under varying load conditions (2015) Mechanical Systems and Signal Processing, 64-65, art. no. 3823, P. 188-216. doi: 10.1016/j.ymssp.2015.03.003

18 **Basu, B., Nagarajaiah, S., Chakraborty, A.** Online identification of linear time-varying stiffness of structural systems by wavelet analysis (2008) Structural Health Monitoring, 7 (1), P 21-36. doi: 10.1177/1475921707081968

19 **Purarjomandlangrudi, A., Nourbakhsh, G., Ghaemmaghami, H., Tan, A.** Application of anomaly technique in wind turbine bearing fault detection (2014) IECON Proceedings (Industrial Electronics Conference), art. o. 7048774, P. 1984 1988. doi: 10.1109/IECON.2014.7048774

Поступило в редакцию 05.01.25

Поступило с исправлениями 09.01.25

Принято в печать 10.03.25

А. Н. Новожилов<sup>1</sup>, \*А. Е. Анарбаев<sup>2</sup>, Т. А. Новожилов<sup>3</sup>,

<sup>1,2</sup>Торайғыров университет, Қазақстан Республикасы, Павлодар қ.

<sup>3</sup>Омбы мемлекеттік техникалық университеті,

Ресей Федерациясы, Омбы қ.

05.01.25 ж. баспаға түсті.

09.01.25 ж. түзетулерімен түсті.

10.03.25 ж. басып шығаруға қабылданды.

## ЖЕЛ ЭЛЕКТР ҚОНДЫРҒЫСЫНЫҢ НЕГІЗГІ БІЛІГІНІҢ ЖЫЛЖЫМАЛЫ МОЙЫНТІРЕКТЕРІН ДИАГНОСТИКАЛАУ ӘДІСТЕРІ

*Жел энергетикалық қондырғыны (ЖЭҚ) пайдалану кезінде қалақтардан түсетін жүктемелер жел жетегінің негізгі білігіне және оның мойынтіректеріне түседі. Бұл олардың тозуы мен істен шығуының негізгі себептерінің бірі. Бұл жағдайда ЖЭҚ зақымдану мөлшері, демек, жөндеу уақыты мен құны негізгі біліктің жылжымалы мойынтіректерін диагностикалаудың қолданылатын әдісіне байланысты.*

*Талдау көрсеткендей, ЖЭҚ негізгі білігінің жылжымалы мойынтіректерін диагностикалаудың барлық белгілі әдістерін ток, акустикалық және діріл әдістеріне, сондай-ақ соққы импульстік әдісіне бөлуге болады. Сонымен қатар, ЖЭҚ диагностикасында ең тиімді, сенімді және жақсы дәлелденген көптеген діріл әдістері екендігі анықталды.*

*Негізгі біліктің жылжымалы мойынтіректеріндегі зақымдануды анықтаудың бұл әдістерінде өлшенетін діріл сигналының сол немесе басқа тәсілмен алынған уақыт, жиілік, жиілік-уақыт аймақтарын зерттеу арқылы жүзеге асырылады. Алайда, бұл әдістердің мүмкіндіктерін талдау көрсеткендей және олар әрдайым ЖЭҚ негізгі білігінің мойынтіректерінің тозу мөлшерін бағалай алмайды. Сонымен қатар, олардың кейбіреулері осы кемшіліктен айтарлықтай айырылған әдістерді әзірлеуге негіз бола алады.*

*Кілтті сөздер: жел қондырғысы, негізгі білік, домалау мойынтіректері, диагностикалық әдістер, діріл әдістері.*

A. N. Novozhilov<sup>1</sup>, \*A. E. Anarbayev<sup>2</sup>, T. A. Novozhilov<sup>3</sup>

<sup>1,2</sup>Toraighyrov University, Republic of Kazakhstan, Pavlodar

<sup>3</sup>Omsk State Technical University, Omsk, Russian Federation

Received 05.01.25

Received in revised form 09.01.25

Accepted for publication 10.03.25

## METHODS FOR DIAGNOSING ROLLING BEARINGS OF THE MAIN SHAFT IN WIND TURBINE

*During operation of a wind turbine (WT), the blade loads fall on the main shaft of the wind turbine and its bearings. This is one of the main reasons for their wear and failure. At the same time, the extent of damage to the WT, and, consequently, the time and cost of repairs depend on the method used to diagnose the rolling bearings of the main shaft.*

*As the analysis showed, all known methods for diagnosing the rolling bearings of the WT main shaft can be divided into current, acoustic and vibration methods, as well as the shock pulse method. It turned out that the most effective, reliable and well-proven in the diagnostics of WT are numerous vibration methods.*

*In these methods, damage to the rolling bearings of the main shaft is detected by studying the time, frequency, frequency-time domains of the measured vibration signal obtained in one way or another. However, as the analysis of the capabilities of these methods showed, they are not always sufficiently capable of assessing the amount of wear of the bearings of the main shaft of the WT. At the same time, some of them can serve as a basis for developing methods largely free of this drawback.*

*Keywords: Wind turbine, main shaft, rolling bearings, diagnostic methods, vibration methods.*

<https://doi.org/>

**\*Б. Онгар<sup>1</sup>, А. А. Жуматова<sup>2</sup>, Ж. С. Дүйсенбек<sup>3</sup>,  
К. А. Баянбаев<sup>4</sup>**

<sup>1,2,4</sup>Қ.И.Сәтбаев атындағы Қазақ ұлттық зерттеу техникалық университеті,  
Қазақстан Республикасы, Алматы қ.

<sup>3</sup>Ф. Даукеев атындағы Алматы энергетика және байланыс университеті,  
Қазақстан Республикасы, Алматы қ.

<sup>1</sup>ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-8333-8343>

<sup>2</sup>ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-9606-7557>

<sup>3</sup>ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-7844-4240>

<sup>4</sup>ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-8355-1769>

<sup>5</sup>ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-9635-0424>

e-mail: [b.ongar@satbayev.university](mailto:b.ongar@satbayev.university)

## **ШАҒЫН ГИДРОЭЛЕКТРОСТАНЦИЯЛАРДЫ ҚОЛДАНУДЫҢ ЖАҢА ӘДІСТЕРІ ЖӘНЕ СИНХРОНДЫ ГЕНЕРАТОРЛАРДЫ ТАЛДАУДЫ КЕҢЕЙТУ**

*Қазіргі заманғы экологиялық талаптарға жауап беретін баламалы энергия көзі ретінде шағын су энергетикасының артықшылықтары талқыланады. Электр энергиясының тәуелсіз көзі ретінде тек баяу ағып жатқан өзендерге арналған, тиімділігі жоғары шағын су электр станциясының жобасы ұсынылады. Шағын су электр станциясының жұмыс істеуі үшін қажетті құрылыстар мен жабдықтар сипатталған.*

*Сонымен қатар экологиялық таза және тиімді энергия көздерін пайдалану қажеттілігі артуда, сондықтан гидроэнергетика саласы, оның ішінде шағын су электр станциялары (ШСЭС), ерекше маңызға ие. Бұл мақалада шағын су электр станцияларын қолданудың жаңа әдістері мен технологиялары, сондай-ақ синхронды генераторлардың жұмыс тиімділігін арттыру үшін жүргізілетін талдау қарастырылады. Шағын ГЭС-тер табиғи су ағынын пайдаланып, экологиялық таза энергия өндіруге мүмкіндік береді, әрі олардың құрылымы мен жұмыс істеу ерекшеліктері су ресурстарын тиімді пайдалануға бағытталған. Жаңа әдістер ретінде гибриді турбиналар, автоматтандырылған басқару жүйелері, энергия*

*сақтау технологиялары мен экологиялық әсерді азайту әдістері енгізілуде. Сонымен қатар, синхронды генераторлардың тиімділігін арттыру үшін жаңа материалдар мен технологиялар қолданылуда, олар гидроэлектростанциялардың тұрақты және тиімді жұмысын қамтамасыз етеді.*

*Бұл мақала шағын су электр станциялары мен синхронды генераторлардың болашағын талқылап, осы саланың дамуына ықпал ететін жаңа тәсілдер мен ғылыми жетістіктерді көрсетуге бағытталған.*

*Кілтті сөздер: Жаңартылған, тиімділік, генератор, шағын, энергия.*

### **Кіріспе**

Жаһандық энергетика саласында экологиялық таза және тиімді энергия көздерін іздеу қазіргі уақытта басты мақсаттардың бірі болып табылады. Әсіресе, жаңартылатын энергия көздері, оның ішінде гидроэнергия, әлемдік энергетикалық жүйенің тұрақтылығы мен экологиялық мәселелерді шешуде маңызды рөл атқарады. Гидроэлектростанциялардың (ГЭС) ішінде шағын су электр станциялары (ШСЭС) ерекше орын алады. Олар табиғи су ресурстарын тиімді пайдалану арқылы экологиялық таза энергия өндіруге мүмкіндік береді. Соңғы жылдары шағын су электр станцияларын қолдану мен дамытуда жаңа әдістер мен технологиялар пайда болуда, олар энергия өндірудің тиімділігін арттырып, экологиялық әсерді минимизациялауға бағытталған [1, 30- б].

Шағын су электр станциялары (ШСЭС) – гидроэнергетикалық қуаты 1-10 МВт аралығында болатын электр станциялар болып табылады. Бұл станциялар өздерінің қуаттылығы мен құрылымы жағынан үлкен гидроэлектростанцияларға қарағанда тиімдірек және экологиялық тұрғыдан зиянсыз жұмыс істей алады. ШСЭС-тің басты ерекшелігі — олар салыстырмалы түрде кіші көлемде және экологиялық мәселелерді минималды деңгейде шешуге мүмкіндік беретін гидрокұрылымдар мен турбиналарды қолданады. Сонымен қатар, бұл станциялар жергілікті деңгейде энергия тапшылығын төмендетуге және елдің энергетикалық тәуелсіздігін арттыруға ықпал етеді.

Шағын су электр станцияларының жұмыс істеу принципі су ағынындағы кинетикалық энергияны электр энергиясына айналдыруға негізделген. Бұл процесс табиғи су көздерінің экологиялық тепе-теңдігін сақтай отырып жүзеге асады, өйткені шағын ГЭС үшін бөгеттер мен су қоймаларының көлемі үлкен емес. Ал синхронды генераторлар - гидроэлектростанциялардың негізгі энергетикалық қондырғылары болып

табылады. Жаңа әдістер мен технологияларды енгізу, оның ішінде шағын су электр станцияларының дамуы мен синхронды генераторларды талдауды кеңейту мәселелері гидроэнергетика саласының болашағын анықтайды [2, 1285 - 6].

Шағын су электр станциялары экологиялық тұрғыдан маңызды, өйткені олар зиянды қалдықтар мен парниктік газдарды шығармайды. Энергия өндіру кезінде экологиялық тиімділікті бағалау үшін көмірқышқыл газының (CO<sub>2</sub>) шығарындыларының төмендеуі есептеледі.

#### **Салыстырмалы түрде:**

- Классикалық энергетикалық көздер (қазба отындары) 1 кВт·сағат үшін орта есеппен 0,9 кг CO<sub>2</sub> шығарады.

- Шағын ГЭС үшін CO<sub>2</sub> шығарындылары нөлге тең.

Жаңа технологиялардың арқасында экологиялық тиімділік айтарлықтай жоғарылайды. Мысалы, жоғары тиімді турбиналар мен автоматтандырылған жүйелер экожүйеге аз әсер етеді және табиғи су ресурстарын сақтау үшін пайдаланылатын көлемді азайтады.

#### **Материалдар мен әдістері**

Соңғы жылдары шағын ГЭС-терде қолданылатын жаңа әдістер мен технологиялар энергия тиімділігін арттыруға бағытталған. Шағын су электр станцияларын дамыту және қолдану барысында жаңа технологиялар мен әдістер енгізілуде. Бұл әдістер су ресурстарын тиімді пайдалану, экологиялық зиянды азайту және энергия өндірудің тиімділігін арттыру мақсатында жасалуда [3, 895 - 6].

#### **Гибридті турбиналар мен көпфункционалы технологиялар**

Заманауи шағын су электр станцияларының басты жаңалықтарының бірі - су ағынының өзгермелі жылдамдығына бейімделетін гибридті турбиналар. Бұл турбиналар әртүрлі гидродинамикалық жағдайларға сәйкес жұмыс істей алады, сол арқылы су ресурстарын тиімді пайдалану мүмкіндігін арттырады. Мысалы, кейбір жаңа турбиналар шағын ағынды су қоймаларында тиімді жұмыс істейді, ал басқалары су деңгейінің төмен немесе жоғары болуына қарамастан энергия өндіруге қабілетті [4, 126 - 6].

#### **Автоматтандырылған басқару жүйелері**

Шағын су электр станцияларында автоматтандырылған бақылау және басқару жүйелері енгізілуде. Бұл жүйелер су деңгейін, ағынды, турбиналардың жұмысын және энергия өндіру тиімділігін нақты уақытта бақылауға мүмкіндік береді. Мұндай жүйелердің артықшылығы — олар жұмыс режимін оңтайландырып, ағынды судың өзгеруіне жауап ретінде энергия өндіруді автоматты түрде реттей алады.

#### **Биоразлагаемый материалдар және экологиялық әсерді азайту**

Шағын ГЭС-терді салу барысында экологиялық әсерді азайту үшін биоразлагаемый материалдар мен экологиялық таза технологиялар қолданылады. Бұл материалдар су ресурстарын қорғауға және экожүйенің тепе-теңдігін сақтау үшін маңызды. Сондай-ақ, жаңа әдістер арқылы шағын ГЭС-тің табиғи ортаға әсері минимизацияланады, мысалы, су экожүйелерінің табиғи тепе-теңдігін сақтау үшін су ресурстарын реттейтін жаңартылған әдістер қолданылуда.

#### **Энергия сақтау жүйелері**

Шағын су электр станцияларының қуаты көбінесе ағынды су жағдайларына байланысты өзгеріп отырады. Осыған байланысты, энергияның артық бөлігі арнайы аккумуляторлық батареялар немесе басқа да энергия сақтау жүйелері арқылы сақталады. Бұл жүйелер энергияның артық мөлшерін сақтап, қажетті уақытта оны қайтадан электр желісіне жібере алады, осылайша энергия жүйесінің тұрақтылығын қамтамасыз етеді [5, 38- 6].

#### **Нәтижелер және талқылау**

Шағын су электр станциялары өздерінің кіші қуаттылығына қарамастан, аймақтық деңгейде электр энергиясын қамтамасыз етуге мүмкіндік береді. Олар ауылдық аймақтарда, шалғай аудандарда энергетикалық тәуелділікті азайтуға, сондай-ақ жергілікті экономиканы дамытуға ықпал етеді. ШСЭС-тердің құнының салыстырмалы түрде төмендігі, энергия өндіру процесінің қарапайымдылығы мен экологиялық тазалығы бұл жобаларды қаржыландыруды жеңілдетеді.

Шағын су электр станцияларының артықшылықтары мен кемшіліктері

Шағын су электр станцияларының басты артықшылығы - олардың экологиялық тазалығы мен тұрақтылығы. Олар энергия өндіру кезінде парниктік газдар мен зиянды қалдықтар шығармайды, сол арқылы экологияға зиян келтірмейді. Сонымен қатар, бұл станциялар жергілікті деңгейде энергия тапшылығын азайтуға мүмкіндік береді, және көбінесе энергия көзі ретінде жаңартылатын су ресурстары пайдаланылады [6, 355 - 6].

Алайда, шағын су электр станцияларының құрылысында кейбір кемшіліктер мен қиындықтар бар. Мысалы, су ресурстарының шектеулілігі және су деңгейінің маусымдық өзгерістері станцияның тұрақты жұмысын қиындатуы мүмкін. Сондай-ақ, шағын су электр станцияларын салу үшін бастапқы капиталды инвестициялау қажет.

Әлемде шағын су электр станцияларының көптеген табысты жобалары бар. Мысалы, Швейцария мен Австрияда шағын ГЭС-тер аймақтық электр энергиясын қамтамасыз ету үшін қолданылуда. Бұл елдерде гидроэнергетика жақсы дамыған және шағын ГЭС жобалары экологиялық тұрғыдан да тиімді болып саналады [7, 255 - 6].

Қазақстанда да шағын су электр станцияларының дамуы қарқынды түрде жүзеге асырылуда. Мысалы, ШҚО, Алматы облысында шағын су электр станциялары іске қосылып, жергілікті тұрғындар мен ауылдарды тұрақты энергиямен қамтамасыз ету мақсатында жұмыс істейді.

Синхронды генераторлар гидроэлектростанцияларда энергия өндірудің маңызды құрамдас бөлігі болып табылады. Олардың жұмысы электр желісінің жиілігі мен фазасымен толық үйлесімді болуы қажет, бұл генераторлардың тиімділігін арттырады және энергияның тұрақты бөлінуін қамтамасыз етеді (1 – сурет).



Сурет –1 Шағын су электр станциядағы синхронды генератор

Синхронды генератордың негізгі мақсаты - механикалық энергияны электр энергиясына түрлендіру. Ол ротор мен статордан тұрады, олардың арасындағы магниттік өріс генератордың жұмысын қамтамасыз етеді. Су ағыны гидротурбинаның роторын айналдырады, нәтижесінде электрлік энергия өндіріледі.

Синхронды генератордың тиімділігін арттыру үшін жаңа әдістер енгізілуде. Бұл әдістер мен технологиялар су көзінің өзгермелі жағдайларына, жүктеме тербелістеріне және жүйедегі авария жағдайларына жауап беруге бағытталған [8, 4216 - 6].

Гибридті синхронды генераторлар: Су ағынының өзгерістеріне икемделе алатын жаңа генераторлар гидроэлектростанциялардың тиімділігін арттырып, жұмыс режимін тұрақтандырады.

Автоматтандырылған бақылау және басқару жүйелері: Генераторлардың жұмысын бақылау және реттеу үшін жаңа басқару жүйелері енгізілді. Бұл жүйелер генератордың жұмысын оңтайландырып, электр энергиясының таралуын реттейді.

Синхронды генераторларды жақсарту және олардың тиімділігін арттыру үшін зерттеулер мен эксперименттер жалғасуда. Қазіргі таңда синхронды генераторлар мен шағын ГЭС-терді біріктіру арқылы энергиялық шығындарды азайту және экологиялық әсерді минимизациялау мақсатында жаңа жобалар әзірленуде.

Есептік нәтижелерде шағын су электр станцияларын қолданудың жаңа әдістері мен синхронды генераторларды талдау арқылы гидроэлектростанциялардың жұмыс тиімділігі мен экологиялық әсерін бағалау мақсатында бірнеше көрсеткіштер есептеледі. Бұл нәтижелер шағын ГЭС-тің жұмыс тиімділігін арттыру, экологиялық зиянды азайту және энергияның тұрақты өндірісі үшін қолданылатын жаңа технологиялар мен әдістердің мүмкіндіктерін көрсетеді.

$$P = \eta \cdot \rho \cdot g \cdot Q \cdot H$$

мұндағы:

$P$  – электр энергиясының қуаты (Вт),

$\eta$  – турбина мен генератордың тиімділігі (коэффициент),

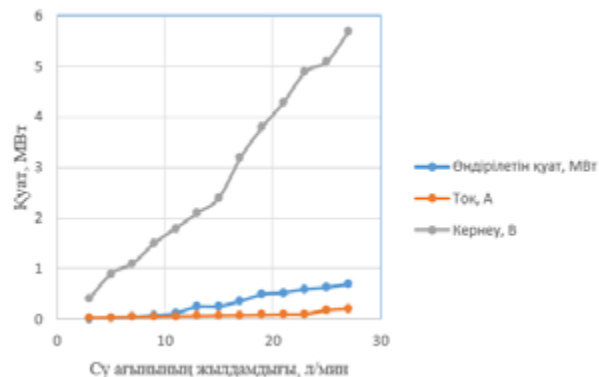
$\rho$  – судың тығыздығы (1000 кг/м<sup>3</sup>),

$g$  – жердің тартылыс үдеуі (9,81 м/с<sup>2</sup>),

$Q$  – су ағынының дебиті (м<sup>3</sup>/с),

$H$  – су қоймасының биіктігі (м).

Айналу жылдамдығының жоғарылауы қуат өндірудің артуына әкеледі, бірақ белгілі бір жылдамдықтан кейін жүйе асқын жүктелуі мүмкін. 2-суретке сүйене отырып,  $u$  осіндегі шығыс кернеуі  $x$  осіндегі су ағынының жылдамдығына тура пропорционал екенін көруге болады [9, 39 - 6]. Су ағынының жылдамдығы артқан сайын генератор тудыратын кернеу де өсті. Энергия жинау жүйесінен өндірілетін су ағынының жылдамдығы мен шығыс тогы үшін ол арқылы көбірек су өткенде, көбірек ток пайда болатынын көрсетеді.



Сурет 2 – Шағын су электр станциядағы синхронды генератор

Синхронды генератордың тиімділігін арттыру үшін энергия өндірудің барлық кезеңдерінде тиімділікті бақылау қажет. Синхронды генератордың пайдалы әсер коэффициенті (ПӘК) төмендегі формула арқылы есептеледі:

$$\eta_{ген} = \frac{P_{алынатын}}{P_{келетін}} \cdot 100$$

мұндағы

$\eta_{ген}$  – синхронды генератордың пайдалы әсер коэффициенті,

$P_{алынатын}$  – генератордан алынатын қуат (Вт),

$P_{келетін}$  – генераторға келетін механикалық қуат (Вт).

Генератордың тиімділігін арттыру мақсатында қолданылатын жаңа материалдар мен технологиялар (мысалы, жоғары өткізгіш материалдар мен магниттік өрісті күшейтетін технологиялар) оның ПӘК-ін жақсартуға мүмкіндік береді. Бұл тұрғыда қазіргі уақытта шағын ГЭС-терде қолданылатын синхронды генераторлардың орташа ПӘК көрсеткіші 90 %-ға жетеді.

Қаржыландыру: Бұл зерттеуді Қазақстан Республикасы Ғылым және жоғары білім министрлігінің Ғылым комитеті қаржыландырды. Грант 2023 жылғы 15 қарашадағы №394 нысаналы қаржыландыру бағдарламасы (ПЦФ)-23-25 2023 жылға арналған келісім бойынша. ИРН № BR21882294 «Жаңартылатын энергия көздеріне негізделген Қазақстанның шалғай аймақтарын автономды энергиямен жабдықтау жүйесі» мақсатты қаржыландыру бағдарламасы аясында алынып жазылды.

## Қорытынды

Шағын су электр станциялары гидроэнергетика саласында болашағы зор бағыттардың бірі болып табылады. Олар экологиялық таза, экономикалық тұрғыдан тиімді және жергілікті деңгейде энергия тапшылығын шешуде маңызды рөл атқарады. Жаңа технологиялар мен әдістерді енгізу, оның ішінде гибриді турбиналар мен автоматтандырылған басқару жүйелері, шағын су электр станцияларының жұмысын тиімді әрі тұрақты етуге мүмкіндік береді. Бұл технологияларды дамыту мен енгізу арқылы шағын ГЭС-терді толық әлеуетін пайдалану және экологиялық таза энергия көздерін арттыру маңызды болып табылады [10, 155 - 6]. Сонымен қатар, синхронды генераторларды талдау мен жақсарту жұмысын кеңейту арқылы гидроэлектростанциялардың энергия өндіру тиімділігі арттырылуда. Бұл жаңа әдістер мен технологиялар әлемнің көптеген елдерінде энергия тапшылығын төмендетуге және экологиялық мәселелерді шешуге ықпал етеді.

Қазіргі уақытта шағын ГЭС-тердің қуаты, экологиялық тиімділігі және энергия сақтау жүйелерінің нәтижесі жаңартылатын энергия көздерін кеңінен пайдалану үшін үлкен әлеуетке ие. Есептік нәтижелер көрсеткендей, жаңа технологиялар мен әдістер шағын су электр станцияларының энергия өндіру тиімділігін айтарлықтай арттырады және экологиялық қауіпсіздікті қамтамасыз етеді.

## ПАЙДАЛАНЫЛҒАН ДЕРЕКТЕР ТІЗІМІ

1 **Хасанов, М. К., Сахаров, В. В.** «Шағын гидроэлектр станцияларының тиімділігін арттыру және оларды жобалаудың жаңа тәсілдері». Энергетика және энергетикалық ресурстар [Текст]. 2017 - № 12.

2 **Lopes, C. M., Gallo, C. A.** «A review of piezoelectrical energy harvesting and applications», IEEE 23rd International Symposium on Industrial Electronics (ISIE) Istanbul., [Текст]. том 2, № 3, pp. 1284-1288, 2014.

3 **Kabir, E., Kumar, P., Kumar, S., Adelodun, A., Kim, K. H.** «Potential and future prospects», [Текст]. Solar energy, Renewable and Sustainable Energy Reviews, № 1, pp. 894-900, 2018.

4 **Семенов, А. С.** «Шағын су электр станцияларын дамыту және олардың жұмыс істеу принциптері». Жаңартылатын энергия көздері [Текст]. Том 3, стр. 125-134, 2018.

5 **Козлов, П. М., Павлов, Ю. Н.** «Шағын гидроэлектр станцияларының экологиялық аспектілері». Табиғатты қорғау инженериясы. [Текст]. Том 1, С. 37-54, 2015.

6 **Николенко, Ю. Н.** «Шағын су электр станцияларын жобалау және басқару әдістері». Гидроэнергетика. [Текст]. Том 4, стр. 354-365, 2016.

7 **Li, X., Wang, C.** «Integration of Small Hydro Power Plants with Renewable Energy Systems». *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 118, 109529. [Text]. P. 254-265, 2020.

8 **James, H. S.** «Synchronous Generators and Their Role in Modern Power Systems». *IEEE Transactions on Power Systems*. [Text]. 33(4), P. 4212-4220, 2018.

9 **Kim, B. S., Zhang, L.** «Control Strategies for Synchronous Generators in Hydropower Plants». *International Journal of Electrical Power Energy Systems*. [Text]. 105, P 37-45, 2019.

10 **Martin, J. E., Benson, S.** «Hydroelectric Power Generation: Dynamics and Modelling of Synchronous Generators». *Renewable Energy*. [Text]. 108, 151-160, 2017.

## REFERENCES

1 **Hasanov, M. K., Sakharov, V. V.** «Şağын gidroelektr stansialarynyñ tiimdılıgın arttyru jäne olardy jobaladyñ jaña täsilderi» [Improvement of efficiency of small hydropower plants and new methods of their design]. *Energy and energy resources*, [Text]. 2017 - № 12.

2 **Lopes, C. M. Gallo, C A.** «A review of piezoelectrical energy harvesting and applications». *IEEE 23rd International Symposium on Industrial Electronics (ISIE) Istanbul*, [Text]. том 2, № 3, pp. 1284-1288, 2014.

3 **Kabir, E. Kumar, P. Kumar, S. Adelodun, A. Kim, K. H.** «Potential and future prospects». [Text]. *Solar energy, Renewable and Sustainable Energy Reviews*, № 1, pp. 894-900, 2018.

4 **Semenov, A. S.** «Şağын su elektr stansialaryn damytu jäne olardyñ jümys isteу prinsipteri» [Development of small hydropower plants and principles of their operation] *Renewable energy sources*. [Text]. Volume 3, p. 125-134, 2018.

5 **Kozlov, P. M., Pavlov, Yu. N.** «Şağын gidroelektr stansialarynyñ ekologialyq aspektleri» [Environmental aspects of small hydropower plants] *Environmental protection engineering*. [Text]. Volume 1, p. 37-54, 2015.

6 **Nikolenko, Yu. N.** «Şağын su elektr stansialaryn jobalau jäne basqaru әдіstери» [Design and management methods of small hydropower plants] *Hydropower*. [Text]. Volume 4, P. 354-365, 2016.

7 **Li, X., Wang, C.** «Integration of Small Hydro Power Plants with Renewable Energy Systems». *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 118, 109529. [Text]. P. 254–265, 2020.

8 **James, H.S.** «Synchronous Generators and Their Role in Modern Power Systems». *IEEE Transactions on Power Systems*. [Text]. 33(4), pp. 4212-4220, 2018.

9 **Kim, B. S., Zhang, L.** «Control Strategies for Synchronous Generators in Hydropower Plants». *International Journal of Electrical Power Energy Systems*. [Text]. 105, P. 37–45, 2019.

10 **Martin, J. E., Benson, S.** «Hydroelectric Power Generation: Dynamics and Modelling of Synchronous Generators». *Renewable Energy*. [Text]. 108, 151-160, 2017.

15.01.25 ж. баспаға түсті.

20.01.25 ж. түзетулерімен түсті.

10.03.25 ж. басып шығаруға қабылданды.

\**B. Ongar<sup>1</sup>, A. A. Zhumatova<sup>2</sup>, Zh. S. Duissenbek<sup>3</sup>, K. A. Bayanbaev<sup>4</sup>*

<sup>1,2,4</sup>Kazakh National Research Technical University named after K. I. Satbaeva, Republic of Kazakhstan, Almaty

<sup>3</sup>Energo University after Gumarbek Daukeev, Republic of Kazakhstan, Almaty  
Received 15.01.25

Received in revised form 20.01.25

Accepted for publication 10.03.25

## NEW METHODS FOR USING SMALL HYDRO POWER PLANTS AND EXPANDING THE ANALYSIS OF SYNCHRONOUS GENERATORS

*The advantages of small hydropower as an alternative energy source that meets modern environmental requirements are discussed. As an independent source of electricity, a project of a small hydroelectric power station with high efficiency is proposed only for slow-flowing rivers. Devices and equipment necessary for the operation of a small hydropower plant are described.*

*At the same time, the need to use environmentally friendly and efficient energy sources is increasing, so the field of hydropower, including small hydroelectric power stations (SHPs), is of particular importance. This article discusses new methods and technologies for the use of small hydropower plants, as well as an analysis to improve the efficiency of synchronous generators. Small hydroelectric power stations allow to produce ecologically clean energy using natural water flow, and their structure and operation features are aimed at efficient use of water resources. Hybrid turbines, automated control systems, energy storage technologies and environmental impact reduction methods are being introduced as new methods. In addition, new materials and technologies*



*are being used to increase the efficiency of synchronous generators, which ensure stable and efficient operation of hydropower plants.*

*This article discusses the future of small hydropower plants and synchronous generators, and aims to highlight new approaches and scientific achievements that contribute to the development of this field.*

*Key words. Renewable, efficiency, reliability, generator, small, energy.*

\*Б. Онгар<sup>1</sup>, А. А. Жуматова<sup>2</sup>, Ж. С. Дүйсенбек<sup>3</sup>, К. А. Баянбаев<sup>4</sup>

<sup>1,2,4</sup>Қазақстан Республикасының Ұлттық Ғылым Академиясының техникалық университетінің  
имени К. И. Сатбаева, Республика Қазақстан, г. Алматы

<sup>3</sup>Алматының энергетика және байланыс университетінің  
Республика Қазақстан, г. Алматы

Поступило в редакцию 15.01.25

Поступило с исправлениями 20.01.25

Принято в печать 10.03.25

## **НОВЫЕ МЕТОДЫ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ МАЛЫХ ГИДРОЭЛЕКТРОСТАНЦИЙ И РАСШИРЕНИЕ АНАЛИЗА СИНХРОННЫХ ГЕНЕРАТОРОВ**

*Обсуждаются преимущества малой гидроэнергетики как альтернативного источника энергии, отвечающего современным экологическим требованиям. В качестве самостоятельного источника электроэнергии предлагается проект малой ГЭС с высоким КПД только для медленно текущих рек. Описаны устройства и оборудование, необходимые для работы малой ГЭС.*

*При этом возрастает необходимость использования экологически чистых и эффективных источников энергии, поэтому особое значение приобретает сфера гидроэнергетики, в том числе малых гидроэлектростанций (МГЭС). В данной статье рассматриваются новые методы и технологии использования малых ГЭС, а также анализ по повышению эффективности синхронных генераторов. Малые ГЭС позволяют производить экологически чистую энергию с использованием естественного стока воды, а их устройство и особенности работы направлены на эффективное использование водных ресурсов. В качестве новых методов внедряются гибридные турбины, автоматизированные системы управления, технологии хранения энергии и методы снижения воздействия на окружающую среду. Кроме того, используются новые материалы и технологии для*

*повышения эффективности синхронных генераторов, обеспечивающих стабильную и эффективную работу гидроэлектростанций.*

*В данной статье рассматривается будущее малых ГЭС и синхронных генераторов, а также ставится цель осветить новые подходы и научные достижения, способствующие развитию этой области.*

*Ключевые слова: Возобновляемые, эффективность, генератор, маленький, энергетический.*

<https://doi.org/>

**Е. В. Приходько<sup>1</sup>, А. С. Никифоров<sup>2</sup>, \*Н. М. Арипова<sup>3</sup>,  
А. К. Кинжибекова<sup>4</sup>, А. Е. Карманов<sup>5</sup>**

<sup>1,2,3,4,5</sup>Торайғыров университет, Республика Казахстан, г. Павлодар

<sup>1</sup>ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-2168-2285>

<sup>2</sup>ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-6977-0957>

<sup>3</sup>ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-2760-8617>

<sup>4</sup>ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-5839-3001>

<sup>5</sup>ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-7512-0275>

\*e-mail: [nazgul\\_2010@mail.ru](mailto:nazgul_2010@mail.ru)

## **ВЛИЯНИЕ ЭКСПЛУАТАЦИОННЫХ ФАКТОРОВ НА ХАРАКТЕРИСТИКИ ОГНЕУПОРОВ ВЫСОКОТЕМПЕРАТУРНЫХ АГРЕГАТОВ**

*Энергетическая эффективность большинства металлургических агрегатов во многом определяется работой футеровок. Продолжительность рабочей кампании агрегата, затраты энергии при нестационарных тепловых режимах и другие показатели зависят от состояния футеровки.*

*Проблема повышения энергетической эффективности работы высокотемпературных агрегатов должна решаться посредством рационализации режимов их тепловой работы, конструкции отдельных элементов и агрегатов в целом.*

*Такие высокотемпературные агрегаты, как разливочные ковши работают с высокотемпературными рабочими средами – температура расплава металла, сливаемого с печи, составляет 1600-1650 оС.*

*Повышение стойкости футеровок высокотемпературных агрегатов является актуальной задачей. Увеличение рабочей кампании агрегатов до ремонта позволяет экономить финансовые и трудовые ресурсы, а также увеличивать производительность. Стойкость футеровок во многом определяется рациональными условиями эксплуатации и соблюдением технологических режимов. В настоящее время вследствие проведения ряда технологических процессов (легирование, десульфурация, раскисление и др.)*

*непосредственно в ковше, усложняется его эксплуатация. При этом к огнеупорам футеровки предъявляются более высокие требования как по качеству, так и по физико-химическим и термомеханическим свойствам.*

*В данной статье приведены результаты анализа процессов работы футеровки высокотемпературных агрегатов. Для этого были использованы методы литературного исследования.*

*Ключевые слова: огнеупорные материалы, футеровка, высокотемпературный агрегат, разливочный ковш, графики разогрева и охлаждения.*

### **Введение**

Разрушение футеровки высокотемпературных агрегатов приводит не только к материальным затратам, связанным со стоимостью огнеупорных материалов и работ по их замене, но и с затратами времени при остановках оборудования на ремонт, а также дополнительными затратами энергии на сушку и разогрев оборудования после ремонтов. Стоит отметить, что возникновение аварийной ситуации часто вызывает опасность для эксплуатационного персонала, что недопустимо.

Для разливочных ковшей, отличающихся от других тепловых агрегатов большим потреблением огнеупорных материалов, достижение равной стойкости всех элементов футеровки позволяет значительно уменьшить удельный расход огнеупоров за счет сокращения горячих ремонтов и исключения случаев необоснованной ломки участков, не выработавших свой эксплуатационный запас.

Футеровка высокотемпературных агрегатов должна отвечать следующим требованиям [1;2]:

- иметь прочностные характеристики, позволяющие производить её эксплуатацию при значительных термических напряжениях, вследствие высоких скоростей изменения температуры;
- иметь высокую стойкость к воздействию химически агрессивных технологических материалов;
- иметь высокую термостойкость, то есть температура плавления огнеупоров должна быть выше рабочих температур агрегата;
- иметь высокую термостойкость.

В процессе работы огнеупорных материалов в составе футеровки они подвергаются воздействию факторов эксплуатации, в соответствии с чем, важными для выбора огнеупоров являются следующие параметры. Высокая плотность и низкая пористость позволяют снизить скорость растворения огнеупоров в расплаве. Высокий предел прочности огнеупоров позволяет

проводить технологические операции со значительными температурными перепадами в футеровке без её разрушения. Это способствует увеличению скоростей нестационарных тепловых режимов работы агрегатов: процессов сушки, разогрева, охлаждения и др.

Свойства и технология обработки исходного сырья также в значительной степени влияет на стойкость огнеупорных материалов. К ним можно отнести: содержание влаги, давление прессования, скорость и продолжительность обжига и охлаждения и др. [3, с.89].

#### Материалы и методы

С развитием технологий растут нагрузки на футеровку и требования, предъявляемые к ней. Анализ показывает, что к факторам, повышающим нагрузку на футеровку, относят:

- энергосбережение и сокращение времени на термообработку огнеупорной массы (скоростной обжиг);
- снижение качества исходного сырья и его несоответствие требованиям технологического регламента;
- нарушение технологического регламента эксплуатации футеровок высокотемпературных агрегатов.

При эксплуатации высокотемпературного агрегата затруднительно влиять на качество поставляемых огнеупорных материалов. Поэтому основное воздействие должно оказываться на рационализацию тепловых режимов работы высокотемпературных агрегатов и на их соблюдения в реальных условиях их эксплуатации.

Как показывает опыт эксплуатации разливочных ковшей, в процессе службы футеровка изнашивается неравномерно. Интенсивность воздействия ряда факторов, таких как химическое растворение огнеупора, термоудар при сливе расплава в ковш определяется значением температуры расплава. Для различных сплавов это значение колеблется в широких пределах, но в среднем составляет от 1530 оС до 1700 оС [4, с. 444-448].

Длительность пребывания расплава в ковше также в значительной мере влияет на разрушение футеровки. В среднем это значение составляет от 150 до 300 минут [5, с. 89-90].

Проведённое нами обследование состояния футеровки разливочных ковшей ферросплавного производства показало, что зоной наибольшего износа является шлаковый пояс и зона слива (падения струи) металла (рисунок 1).

Разрушение других зон поверхности футеровки объясняется значительными перепадами температур, в первую очередь при сливе расплава в ковш. Даже для футеровки ковша в «неостывшем» состоянии разница температур расплава и поверхности футеровки может достигать до 900 оС.



Рисунок 1 – Зоны наибольшего износа футеровки разливочного ковша

Значительные перепады температур возникают также при неконтролируемом охлаждении футеровок разливочных ковшей в атмосфере плавильного цеха.

Разрушение огнеупоров при перепадах температур по их сечению вызвано неравномерным температурным расширением слоёв огнеупора при перепадах температур по сечению футеровки.

Более холодные слои футеровки расширяются не так интенсивно, как более нагретые и, тем самым, являются источниками возникновения термических напряжений. При значении термических напряжений выше предела прочности огнеупорного материала происходит разрушение материала: возникновение микротрещин или трещин и дальнейшее разрушение.

Проведённый анализ показывает, что влияние факторов эксплуатации на разрушение футеровки можно распределить следующим образом (рисунок 2).

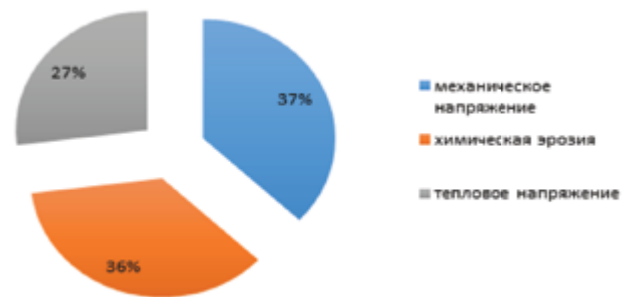


Рисунок 2 – Факторы, возникающие в процессе эксплуатации футеровок разливочных ковшей

### Результаты и обсуждения

Изучив эксплуатационные факторы, влияющие на срок службы футеровок разливочных ковшей можно сделать вывод, что механическое напряжение вызвано деформацией металлического кожуха разливочного ковша и тепловым расширением огнеупорной кладки; химическая эрозия вызвана эрозией силикатных, ферритовых и щелочных солей [6, с.893-895]; тепловое напряжение вызвано перегревом и тепловым ударом.

С учётом того, что скорость изменения температуры футеровки является определяющей при возникновении термических напряжений, актуальной проблемой становится определение температурных полей по сечению футеровки в условиях нестационарной теплопроводности.

На основании значений температур в футеровке производится расчёт термических напряжений.

Результаты работ авторов [7;8;9;10;11;12;13] свидетельствуют, что из-за чрезмерного термического напряжения, которое серьезно влияет на производительность и срок службы футеровки разливочного ковша. Полученные значения термических напряжений сравниваются с пределом прочности огнеупорных материалов на сжатие (для напряжений сжатия) и пределом прочности на растяжение (для напряжений растяжения). Для указанного сравнения необходимы данные по термическим свойствам используемых огнеупоров. Эти данные могут быть взяты из справочной литературы или могут быть получены в лабораторных условиях.

При работе огнеупорных материалов в футеровках высокотемпературных агрегатов происходит изменение как их теплофизических свойств (коэффициента теплопроводности, теплоёмкости и др.), так и термических свойств (предела прочности, термостойкости и др.)

вследствие воздействия условий эксплуатации: расплава, шлака, высоких температур и др. Для термических расчётов футеровок с частично отработавшими огнеупорами необходимы лабораторные исследования их теплофизических и термомеханических свойств.

### Информация о финансировании

Исследование финансируется Комитетом науки Министерства науки и высшего образования Республики Казахстан (грант №AP19675777).

### Выводы

Проведённые нами исследования показывают, что условия эксплуатации в значительной степени влияют на свойства огнеупоров [14, с.5-11]. Так, для огнеупоров марки ШКУ-32 проведенные лабораторные исследования показали, что:

- предел прочности на сжатие огнеупоров после трёх плавов выше первоначального значения на 40 %;
- значение предела прочности на растяжение для огнеупоров после трёх плавов выше справочного значения новых огнеупоров на 2 %;
- коэффициент теплопроводности огнеупоров, отработавших в футеровке, увеличивается до 12 % от первоначального значения.

Результаты исследований показывают, что комплексный подход, а именно изучение теплофизических и термических свойств футеровки разливочного ковша даёт возможность значительно снизить термические напряжения при нестационарных тепловых процессах в футеровке.

### СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

- 1 **Ramachandra Rao, S.** Pyrometallurgical Processing [Text] // Waste Management Series. Elsevier. –2006. –Volume 7. P. 127-165, [https://doi.org/10.1016/S0713-2743\(06\)80091-7](https://doi.org/10.1016/S0713-2743(06)80091-7).
- 2 **Buhr, A.** Trends in clean steel technology and refractory engineering / A. Buhr, R. Bruckhaus, R. Fandrich [Text] // RWF. – 2016. –Vol. 8, № 1. –P. 57–63.
- 3 **Buyakov, A., Shmakov, V., Zabolotsky, A., Chumakov, Y., Shilko, E.** Refractory ceramics based on magnesium–aluminate spinel and periclase of the Satka deposit [Text] // Materials Chemistry and Physics. –2024. –Volume 313. 128760, <https://doi.org/10.1016/j.matchemphys.2023.128760>.
- 4 **Арипова, Н., Приходько, Е., Карманов, А., Онгар, Б., Егзекова, А.** (2022). Анализ влияния эксплуатационных факторов на стойкость футеровок разливочных ковшей [Текст] // Вестник КазАТК. –2022. – №4 (123). – С. 444–452.

5 **Очагова, И.Г.** Совершенствование футеровки ковшей для разливки и внепечной обработки стали за рубежом [Текст] // Бюл. «Черная металлургия». –2008. – № 2. – С. 89 – 93

6 **Шешуков, О.Ю., Михеенков, М.А., Вязникова, Е.А., Быков, А.С., Ведмидь, Л.Б.** Изменение фазового состава сидеритов бакальского месторождения при нагреве [Текст] // Известия высших учебных заведений. Черная металлургия. –2018. –Том 61. № 11. –С. 891 – 897.

7 **Yajie, Dai.** Thermomechanical behavior of alumina–magnesia castables and numerical modeling of the steel ladle thermal process [Electronic resource]. DOI:[10.1111/ijac.14936](https://doi.org/10.1111/ijac.14936)

8 **Prikhodko, E.; Nikiforov, A.; Kinzhibekova, A.; Aripova, N.; Karmanov, A.; Ryndin, V.** Analysis of the Cooling Modes of the Lining of a Ferroalloy-Casting Ladle [Text] // *Energies*. –2024. –№ 17. – P.1229. <https://doi.org/10.3390/en17051229>.

9 **Zabolotsky, A.V.** Computer simulation of thermal shock in refractory lining of metallurgical installations [Text] // Proceedings of the 2010 international conference on Mathematical models for engineering science (MMES'10), Puerto De La Cruz, Tenerife. –2010. – P.73–76.

Damage of monolithic refractory linings in steel ladles during drying

10 Schmitt, Nicolas . Damage of Monolithic Refractory Linings in Steel Ladles During Drying [Electronic resource] DOI:[10.1179/096797804225012873](https://doi.org/10.1179/096797804225012873).

11 Gongfa, Li. Life Prediction Mechanism of Ladle Composite Structure Body Based on Simulation Technology [Text] // Archives of Metallurgy and Materials. – 2019. DOI:[10.24425/amm.2019.130126](https://doi.org/10.24425/amm.2019.130126).

12 Zichao, Rong *et al.* . [Electronic resource] *Mater. Res. Express*. –2022. 9 045601. DOI [10.1088/2053-1591/ac648c](https://doi.org/10.1088/2053-1591/ac648c).

13 Gerle, Anna., Czechowski, Jerzy., Podwórny, Jacek., Dahlem, Emilie. An analysis of factors influencing the determination of refractory materials' compression strength [Text] // *Materiały Ceramiczne / Ceramic Materials*. –2015. – № 67.

14 **Prikhodko, E.V., Nikiforov, A.S., Kinzhibekova, A.K., Aripova, N.M., Paramonov, A.M., Karmanov, A.E.** Analysis of the Effect of Temperature on the Ultimate Strength of Refractory Materials [Text] // «*Energies*». –2023. – Vol. 16. – P. 1-12.

## REFERENCES

1 **Ramachandra Rao, S.** Pyrometallurgical Processing [Text] // Waste Management Series. Elsevier. –2006. –Volume 7. P. 127-165, [https://doi.org/10.1016/S0713-2743\(06\)80091-7](https://doi.org/10.1016/S0713-2743(06)80091-7).

2 **Buhr, A.** Trends in clean steel technology and refractory engineering / A. Buhr, R. Bruckhaus, R. Fandrich [Text] // RWF. – 2016. –Vol. 8, № 1. –P. 57–63.

3 **Buyakov, A., Shmakov, V., Zabolotsky, A., Chumakov, Y., Shilko, E.** Refractory ceramics based on magnesium–aluminate spinel and periclase of the Satka deposit [Text] // *Materials Chemistry and Physics*. –2024. –Volume 313. 128760, <https://doi.org/10.1016/j.matchemphys.2023.128760>.

4 **Aripova, N., Prikhodko, E., Karmanov, A., Ongar, B., Egzekova, A.** Analiz vliyanya ekspluatatsionnykh faktorov na stoikost futerovok razlivochnykh kovshei [Analysis of the influence of operational factors on the durability of ladle linings] [Text] // *Vestnik KazATK*. –2022. – №4 (123). – P. 444–452.

5 **Ochagova, I.G.** Sovershenstvovanie futerovki kovshei dlya razlivki I vnepechnoi obrabotki stali za rubezhom [Improving the lining of ladles for casting and after-furnace processing of steel abroad] [Text] // *Byl. Chernaya metallurgiya*. – 2008. – № 2. – P. 89 – 93.

6 **Sheshukov, O.Yu., Mikheenkova, M.A., Vyaznikova, E.A., Bykov, A.S., Vedmid, L.B.** Izmenenie fazovogo sostava sideritov bakalskogo mestorozhdenia pri nagreve [Change in the phase composition of siderites from the Bakal deposit upon heating] [Text] // *Izvestia vysshih uchebnykh zavedenii. Chernaya metallurgiya*. –2018. – № 11 (31). –P. 891 – 897.

7 **Yajie, Dai.** Thermomechanical behavior of alumina–magnesia castables and numerical modeling of the steel ladle thermal process [Electronic resource]. DOI:[10.1111/ijac.14936](https://doi.org/10.1111/ijac.14936).

8 **Prikhodko, E.; Nikiforov, A.; Kinzhibekova, A.; Aripova, N.; Karmanov, A.; Ryndin, V.** Analysis of the Cooling Modes of the Lining of a Ferroalloy-Casting Ladle [Text] // *Energies*. –2024. –№ 17. – P.1229. <https://doi.org/10.3390/en17051229>.

9 **Zabolotsky, A.V.** Computer simulation of thermal shock in refractory lining of metallurgical installations [Text] // Proceedings of the 2010 international conference on Mathematical models for engineering science (MMES'10), Puerto De La Cruz, Tenerife. –2010. – P.73-76.

Damage of monolithic refractory linings in steel ladles during drying

10 Schmitt, Nicolas . Damage of Monolithic Refractory Linings in Steel Ladles During Drying [Electronic resource] DOI:[10.1179/096797804225012873](https://doi.org/10.1179/096797804225012873).

11 **Gongfa, Li.** Life Prediction Mechanism of Ladle Composite Structure Body Based on Simulation Technology [Text] // Archives of Metallurgy and Materials. – 2019. DOI:[10.24425/amm.2019.130126](https://doi.org/10.24425/amm.2019.130126).

12 Zichao, Rong *et al.* [Electronic resource] *Mater. Res. Express.* –2022. 9 045601. DOI 10.1088/2053-1591/ac648c

13 Gerle, Anna., Czechowski, Jerzy., Podwórny, Jacek., Dahlem, Emilie. An analysis of factors influencing the determination of refractory materials' compression strength [Text] // *Materiały Ceramiczne / Ceramic Materials.* –2015. – № 67.

14 Prikhodko, E.V., Nikiforov, A.S., Kinzhibekova, A.K., Aripova, N.M., Paramonov, A.M., Karmanov, A.E. Analysis of the Effect of Temperature on the Ultimate Strength of Refractory Materials [Text] // «*Energies.*» –2023. – Vol. 16. – P. 1–12.

Поступило в редакцию 10.12.24  
Поступило с исправлениями 17.01.25  
Принято в печать 10.03.25

*Е. В. Приходько*<sup>1</sup>, *А. С. Никифоров*<sup>2</sup>, \**Н. М. Арипова*<sup>3</sup>,  
*А. К. Кинжибекова*<sup>4</sup>, *А. Е. Карманов*<sup>5</sup>  
<sup>1,2,3,4,5</sup>Торайғыров университет», Қазақстан Республикасы, Павлодар қ.  
10.12.24 ж. баспаға түсті.  
17.01.25 ж. түзетулерімен түсті.  
10.03.25 ж. басып шығаруға қабылданды.

### ЖОҒАРЫ ТЕМПЕРАТУРАЛЫ ҚОНДЫРҒЫЛАРДЫҢ ОТҚА ТӨЗІМДІ МАТЕРИАЛДАРЫНЫҢ ПАЙДАЛАНУ ФАКТОРЛАРЫНЫҢ СИПАТТАМАЛАРЫНА ӘСЕРІ

*Көптеген металлургиялық қондырғылардың энергетикалық тиімділігі көбінесе футеровканың жұмысымен анықталады. Қондырғының жұмыс науқанының ұзақтығы, стационарлық емес жылу режимдеріндегі энергия шығындары және басқа Көрсеткіштер қаптаманың күйіне байланысты.*

*Жоғары температуралы қондырғылардың энергетикалық тиімділігін арттыру мәселесі олардың жылу жұмысының режимдерін, жеке элементтер мен тұтастай алғанда агрегаттардың дизайнын ұтымды ету арқылы шешілуі керек.*

*Қую шелектерінің сияқты жоғары температуралы қондырғылар жоғары температуралы жұмыс орталарымен жұмыс істейді, пештен құйылатын металдың балқу температурасы 1600-1650 оС құрайды. Жоғары температуралы қондырғылардың қаптамаларының беріктігін арттыру өзекті міндет болып табылады. Жөндеуге дейін*

*қондырғылардың жұмыс науқанын ұлғайту қаржылық және еңбек ресурстарын үнемдеуге, сондай-ақ өнімділікті арттыруға мүмкіндік береді. Футеровканың беріктігі көбінесе ұтымды пайдалану жағдайларымен және технологиялық режимдердің сақталуымен анықталады. Қазіргі уақытта шелектегі бірқатар технологиялық процестердің (балқуы, күкіртсіздендіру, тотықсыздандыру және т.б.) нәтижесінде оны пайдалану күрделене түседі. Бұл ретте футеровканың отқа төзімділігіне сапасы жағынан да, физика-химиялық және термомеханикалық қасиеттері бойынша да жоғары талаптар қойылады.*

*Бұл мақалада жоғары температуралы қондырғыларды футеровка процестерін талдау нәтижелері келтірілген. Ол үшін әдеби зерттеу әдістері қолданылды.*

*Кілтті сөздер: отқа төзімді материалдар, футеровка, жоғары температуралы қондырғы, құю шөміші, жылыту және салқындату кестелері.*

*Е. V. Prikhodko*<sup>1</sup>, *А. S. Nikiforov*<sup>2</sup>, \**N. M. Aripova*<sup>3</sup>,  
*А. К. Kinzhibekova*<sup>4</sup>, *А. Е. Karmanov*<sup>5</sup>  
<sup>1,2,3,4,5</sup>Toraigyrov University», Republic of Kazakhstan, Pavlodar  
Received 10.12.24  
Received in revised form 17.01.25  
Accepted for publication 10.03.25

### THE INFLUENCE OF OPERATIONAL FACTORS ON THE CHARACTERISTICS OF REFRACTORIES OF HIGH- TEMPERATURE UNITS

*The energy efficiency of most metallurgical units is largely determined by the work of the linings. The duration of the unit's working campaign, energy consumption under non-stationary thermal conditions, and other indicators depend on the condition of the lining.*

*The problem of increasing the energy efficiency of high-temperature units should be solved by rationalizing the modes of their thermal operation, the design of individual elements and units as a whole.*

*Such high-temperature units as filling buckets work with high-temperature working media the temperature of the molten metal drained from the furnace is 1600-1650 °C. Increasing the durability of the linings of high-temperature aggregates is an urgent task. Increasing the working*

*campaign of the units before repair allows you to save financial and labor resources, as well as increase productivity. The durability of linings is largely determined by rational operating conditions and compliance with technological regimes. Currently, due to a number of technological processes (alloying, desulfurization, deoxidation, etc.) directly in the bucket, its operation is becoming more complicated. At the same time, higher requirements are placed on lining refractories both in terms of quality and physico-chemical and thermomechanical properties.*

*This article presents the results of an analysis of the lining processes of high-temperature units. For this purpose, the methods of literary research were used.*

*Keywords: refractory materials, lining, high-temperature unit, filling ladle, heating and cooling schedules.*

FTAMP 44.29.29

<https://doi.org/>

**\*А. С. Расмухаметова<sup>1</sup>, М. А. Ереали<sup>2</sup>, К. С. Олжабаева<sup>3</sup>,  
Б. Ж. Мустагулова<sup>4</sup>**

<sup>1 2 3 4</sup>Ф. Дәукеев атындағы Алматы энергетика және байланыс университеті, Қазақстан Республикасы, Алматы қ.

<sup>1</sup>ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-1376-6112>

<sup>2</sup>ORCID: <https://orcid.org/0009-0006-7060-5293>

<sup>3</sup>ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-2018-8835>

<sup>4</sup>ORCID: <https://orcid.org/0009-0004-5191-8310>

\* e-mail: [a.rasmukhametova@aes.kz](mailto:a.rasmukhametova@aes.kz)

## **ЖАҢАРТЫЛАТЫН ЭНЕРГИЯ КӨЗДЕРІНІҢ ИНТЕГРАЦИЯСЫ ҮШІН ЭНЕРГИЯНЫ ЖИНАҚТАУ ЖҮЙЕЛЕРІНЕ САЛЫСТЫРМАЛЫ ТАЛДАУ**

Бұл мақалада жаңартылатын энергия көздерінің ауқымды интеграциясы үшін энергияны сақтау технологияларына жан-жақты шолу және салыстырмалы талдау берілген. Жұмыста желіге интеграциялаудың әртүрлі сценарийлері үшін қолайлы нұсқаларды анықтау мақсатында техникалық, қаржылық және экологиялық критерийлер бойынша әртүрлі энергияны жинақтаудың жүйелері (ЭЖЖ) бағаланады. Әдіснамалық тұрғыдан, энергияны сақтау түріне байланысты жіктеледі және техникалық сипаттамалары, қаржылық көрсеткіші және қоршаған ортаға әсері бойынша бағаланады. Су жинаушы электростанциялары (СЖЭ) сияқты механикалық энергияны сақтау жүйелері сенімділік пен тиімділікті қамтамасыз ететін жетілген шешім болып табылады, әсіресе энергияны аса ірі көлемде сақтау үшін. Электрохимиялық ЭЖЖ, соның ішінде литий-ионды (Li-ion) батареялар және ванадий редокс-батареялар (ВРБ) масштабталу икемдігі мен жоғары энергия тығыздығын көрсетеді, бірақ қаржылық салымдар мен экологиялық тұрақтылыққа қатысты мәселелерге тап болады. Сонымен қатар, суперконденсаторлар және асқыноткізгіштік магниттік энергияны жинақтау жүйелері (АМЭЖЖ) сияқты жаңа технологиялар жоғары қуаттың жылдам шығарылуының арқасында электр желісінің тұрақтылығы мен сапасын арттыруға көмектеседі. Мақалада тұрақты энергетикалық

*болашақты қамтамасыз ету үшін негізделген шешімдер қабылдауға ықпал ететін энергетикалық жүйеге интеграциялаудың мәселелерін шешу үшін ЭЖЖ технологияларының әртарап тандырылған портфолиосының қажеттілігі көрсетілген.*

*Кілтті сөздер: энергияны жинақтау жүйелері, желіге интеграция, жаңартылатын энергия көздері, салыстырмалы талдау, ЭЖЖ қолдануы*

### **Кіріспе**

Жаңартылатын энергия көздерін электр желісіне интеграциялау тұрақты және сенімді энергетикалық болашаққа қол жеткізу үшін шешуші рөл атқарады. Дегенмен, жаңартылатын энергия өндірісінің айнымалы және өзгермелі сипаты, электр желілерінің тұрақтылығы мен тиімділігіне айтарлықтай қиындықтар туғызады. Энергияны сақтау жүйелері артық энергияны сақтау және қажеті бойынша беру арқылы осы мәселелерді тиімді шешуді ұсынады. Бұл мақалада техникалық, қаржылық және экологиялық аспектілерін бағалай отырып, әртүрлі ЭЖЖ технологияларына жан-жақты шолу берілген. Энергияны сақтаудың механикалық, электрохимиялық, жылу, электр және химиялық әдістерін қарастыра отырып, бұл зерттеу жаңартылатын энергия көздеріне негізделген энергия жүйелеріне ауқымды интеграция үшін ең қолайлы технологияларды анықтауға бағытталған. Өнімділікке, экономикалық тиімділікке және қоршаған ортаға әсерге негізделген жүйелі салыстырудың арқасында бұл шолу негізделген шешімдер қабылдауға және ЭЖЖ технологияларын стратегиялық енгізуге жол ашып, энергетика секторындағы мүдделі тараптар үшін құнды мәліметтер береді.

Материалдар мен әдістері

ЭЖЖ технологияларын таңдау қолдану мақсатына байланысты, өйткені әр түрлі мақсаттар үшін әр түрлі талаптарға ие және бүгінгі таңда, барлық пайдалану сценарийлері үшін барлық критерийлер бойынша технологиялардың ешқайсысы қанағаттандыра алмайды. ЭЖЖ қолданудың негізгі бағыттарын мақсаты бойынша үш топқа бөлуге болады: электр энергиясының сапасын сақтау, қуатты сұранысын теңестіру және тәуліктік сұраныс. Қолдану аясы бойынша 5 негізгі топқа бөлінеді: генерацияны қолдау және үлкен көлемді сақтау қызметтері; инфрақұрылымды қолдау қызметтері; тарату инфрақұрылымын қолдау қызметтері; қосымша қызметтері; тұтынушылардың энергия менеджментін қамтамасыз ететін қызметтер [1, 52-б.]. Әрбір қызмет түрі үшін ЭЖЖ-не қойылатын техникалық талаптар бар, мысалы, энергия сапасын сақтау үшін жоғары қуатты энергияны жылдам босату немесе энергияның тәуліктік сұраныс үшін ұзақ разрядтау уақыты бар үлкен көлемдегі энергияны сақтау қабілеті.

ЭЖЖ үш негізгі критерий мен ішкі критерий бойынша салыстырылды. Негізгі критерийлер техникалық, қаржылық және экологиялық критерийлер болып табылады.

Техникалық критерийлер жүйенің өнімділігі мен сенімділігін бағалауға мүмкіндік береді және оның көмегімен ЭЖЖ қолдану сценарийлері таңдалады. Техникалық критерий бойынша көлемдік энергия және қуат тығыздығы, гравиметриялық энергия және қуат тығыздығы, АС-АС жүйесінің тиімділігі, жауап беру уақыты, разряд ұзақтығы және технологиялық жетілуі сияқты параметрлер бағаланады. Технологиялық жетілу дегеніміз-технологияның практикалық қолдануға дайындығы мен сенімділігі. Жетілуге әсер ететін факторларға ғылыми-зерттеу және тәжірибелік-конструкторлық кезең, нақты өмірдегі сипаттамалар және коммерциялық қол жетімділік жатады.

Қаржылық бағалау меншікті құн көрсеткіштерін талдауды қамтиды. Бұған белгіленген қуат бірлігі мен сақталған көлем бірлігі үшін күрделі шығындардың меншікті құны, сондай-ақ қызмет көрсету және пайдалану шығындары кіреді. Күтілетін қызмет ету мерзімін және өмірлік циклдар санының бағалауы, ЭЖЖ экономикалық өміршеңдігі мен беріктігін бағалауға көмектеседі. Бұл сандық талдау шешім қабылдаушыларға инвестицияның орындылығы мен ықтимал қайтарымын бағалауға мүмкіндік береді.

Қоршаған ортаға әсерді бағалау өндіріс, пайдалану және кәдеге жарату кезіндегі көміртегі ізін және технологияның бүкіл өмірлік циклі ішінде қоршаған ортаның ластануын бағалауды қамтиды. Жалпы экологиялық іздерді бағалау тұрақты даму мақсаттарына сәйкестікті қамтамасыз етеді.





Сурет 1 – ЭЖЖ технологияларының бөлінуі. СЖЭ – су жинаушы электростанция, ПЭЖЖ пневматикалық энергия жинақтау жүйесі, МЭЖЖ ө маховиктік энергия жинақтау жүйесі, Pb-Acid ө Қорғасын қышқыл батареясы, NaS – натрий-күкірт батареясы, NaNiCl<sub>2</sub> – натрий-никель-хлор батареясы, ВРБ – Ванадий редокс-батареясы, NiCd – никель-кадмий батареясы, Li-ion – литий ион батареясы, АМЭЖЖ – асқынөткізгіштік магниттік энергия жинақтау жүйесі, СКЭЖЖ – Суперконденсаторлық энергия жинақтау жүйесі, H<sub>2</sub> – сутек негізіндегі энергия жинақтау жүйесі.

Энергияны сақтау әдістеріне негізделген ЭЖЖ таңдау және жіктеу. СЖЭ, пневматикалық ЭЖЖ және маховиктік ЭЖЖ сияқты механикалық энергияны сақтау жүйелері олардың сенімділігі мен масштабталуына байланысты таңдалды. Литий-ионды батареяларды, қорғасын қышқылды батареяларды және ванадий тотықтандырғыш батареяларды қоса алғанда, электрохимиялық энергияны сақтау жүйелері жоғары энергия тығыздығы мен жылдам жауап беру мүмкіндігі үшін таңдалды. Асқынөткізгіштік магниттік энергия сақтау және суперконденсаторлар сияқты электр энергиясын сақтау жүйелері жоғары қуатты лезде шығару қабілеті үшін таңдалды. Ақырында, химиялық энергияны сақтау жүйелері, сутегі отын элементтері, энергияны ұзақ уақыт сақтау қабілеті және таза энергияны түрлендіру мүмкіндігі үшін таңдалды. Әр санаттың өзіндік артықшылықтары бар, бұл энергия жүйелеріне интеграциялау үшін энергияны сақтау технологияларын жан-жақты қарастыруды қамтамасыз етеді.

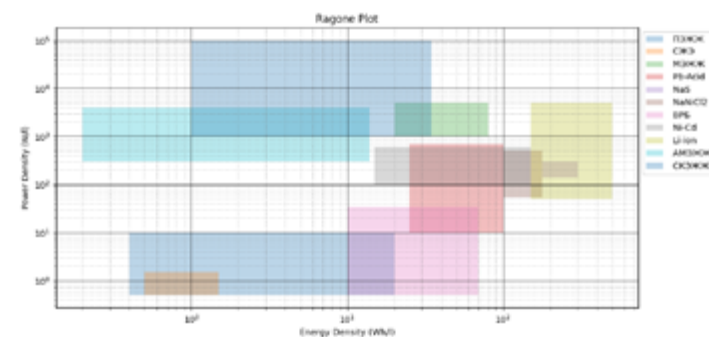
#### Нәтижелер және талқылау

СЖЭ және ПЭЖЖ айтарлықтай сыйымдылығымен және разрядтау ұзақтығымен ерекшеленеді, және электр желісінің масштабында энергияны басқаруға ықтималды технологиялар. СЖЭ әдетте қуаттың тығыздығын 0,5-тен 1,5 Вт/л - ге дейін және энергия тығыздығын 0,5-тен 2 Втсағ/л-ге

дейін көрсетеді, бұл ретте тиімділігі 65-87 %, ал разрядтың ұзақтығы 1-24+ сағатты құрайды. Бұл бүкіл әлем бойынша жалпы орнатылған қуаты 178 ГВт-тан асатын жетілген технология, бұл әлемдегі жалпы энергия жинақтау жүйелерінің 90 % - дан астамын құрайды [3, 61-6].

ПЭЖЖ ұқсас диапазонды ұсынады: қуат тығыздығы 0,5-2 Вт/л, энергия тығыздығы 20 Втсағ/л дейін, тиімділігі 50-89 %, разрядтың ұзақтығы 1-24+ сағат. Дегенмен, ПЭЖЖ географиялық шектеулер және кейбір қондырғыларда жанармайға тәуелділік сияқты шектеулерге тап болады, бұл өмір барысында СО<sub>2</sub> шығарындыларына әкеледі. Дегенмен, екі технология да айтарлықтай инвестицияларды қажет етеді 1716-2207 \$/кВт СЖЭ үшін және 1087-1784 ПЭЖЖ үшін. Ұзақ қызмет ету мерзімі, әдетте ГАЭС үшін 40-60 жыл және ПЭЖЖ үшін 20-40 жыл, жоғары цикл ресурсымен бірге оларды географиялық және қаржылық шектеулерге қарамастан энергияны жаппай сақтаудың сенімді шешімдеріне айналдырады.

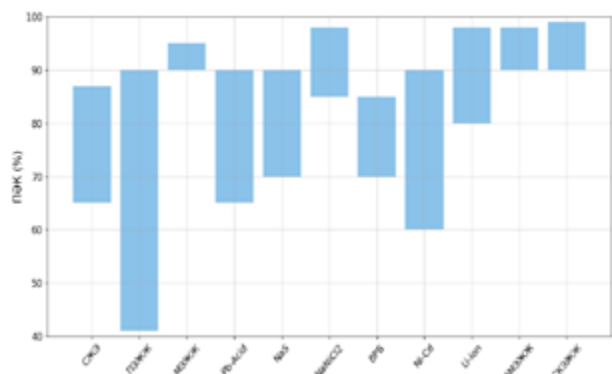
Одан бөлек, МЭЖЖ төмен техникалық қызмет көрсетумен, ұзақ өмірлік циклмен және жоғары тиімділікпен ерекшеленеді: қуат тығыздығы 1000-5000 Вт/л-ге дейін, ал энергия тығыздығы 800-2000 Втсағ/л-ге дейін. Сонымен қатар жылдам жауап беру уақытын және разрядтың ұзақтығын 15 секундтан 15 минутқа дейін ұсынады, бұл оларды желінің тұрақтылығы мен жиілігін реттеуге қолайлы етеді.



Сурет 2 – Рагон диаграммасы, кесте 1 мәліметтері бойынша салынған

Қорғасын қышқылды (ҚҚА, Pb-Acid) аккумуляторлары орташа энергия тығыздығымен (50-90 Вт/кг) және тиімділігімен (65-90 %), сондай-ақ жылдам жауап беру уақытымен (<10 миллисекунд) ерекшеленеді. Бұл сипаттамалар оларды қысқа мерзімді резервтеуге және желіні тұрақтандыруға қолайлы. ҚҚА орташа тиімділікке, төмен шығындарға, үйлесімді өндіріске, жылдам

жауап беру уақытына және өздігінен разрядтың төмен жылдамдығына, үзіліссіз зарядпен жұмыс істеу қабілетіне және жақсы кәдеге жарату мүмкіндігіне ие. Олардың салыстырмалы түрде қысқа қызмет ету мерзімі (5-15 жыл) және жоғары техникалық қызмет көрсету талаптары ЖЭК интеграциясы үшін негізгі шектеу болып табылады.



Сурет 3 – ЭЖЖ технологияларының пайдалы әсер коэффициенттерінің салыстырмасы, кесте 1 мәліметтері бойынша салынған

Натрий-күкірт (NaS) және натрий-никель-хлорид (NaNiCl<sub>2</sub>) батареялар жоғары энергия тығыздығын (150-300 Вт/кг) және тиімділікті (75-90%) қамтамасыз етеді. Екі түрдің де разряд ұзақтығы 24 сағатқа дейін жетеді, бұл оларды жүктемені теңестіруге және жаңартылатын энергиямен тұрақты қамтамасыз етуге жарамды етеді. Дегенмен, олар жоғары жұмыс температурасын (300-350°C) қажет етеді, бұл термореттелу, қауіпсіздік және жүйенің күрделілігіне қатысты мәселелерге ие. NaS батареялары жоғары жұмыс температурасын қажет етеді, бұл сенімді қауіпсіздік жүйелерін қажет етеді. Сонымен қатар, олар күкірттің төмен электр активтілігі, Na дендриттерінің түзілуіне байланысты сыйымдылықтың тез деградациясы және полисульфидтің шаттл әсері сияқты мәселелерге тап [4, 241-6.].

Негізгі техникалық көрсеткіштер 1 - ші кестеде [5, 14-6.] the energy grid is changing to fit the increasing energy demands but also to support the rapid penetration of renewable energy sources. As a result, energy storage devices emerge to add buffer capacity and to reinforce residential and commercial usage, as an attempt to improve the overall utilization of the available green energy. Although

various research has been conducted in the field including photovoltaic and wind applications, the study on suitability identification of different storage devices for various stationary application types is still the gap observed which needs further study and verification. The review performed fills these gaps by investigating the current status and applicability of energy storage devices, and the most suitable type of storage technologies for grid support applications are identified. Moreover, various technical, economic and environmental impact evaluation criteria's are taken into consideration for the identification of their characteristics and potentials. The comprehensive review shows that, from the electrochemical storage category, the lithium-ion battery fits both low and medium-size applications with high power and energy density requirements. From the electrical storage categories, capacitors, supercapacitors, and superconductive magnetic energy storage devices are identified as appropriate for high power applications. Besides, thermal energy storage is identified as suitable in seasonal and bulk energy application areas. With proper identification of the application's requirement and based on the techno-economic, and environmental impact investigations of energy storage devices, the use of a hybrid solutions with a combination of various storage devices is found to be a viable solution in the sector.»»container-title»:»Renewable and Sustainable Energy Reviews»,»DOI»:»10.1016/j.rser.2022.112213»,»ISSN»:»13640321»,»journalAbbreviation»:»Renewable and Sustainable Energy Reviews»,»language»:»en»,»page»:»112213»,»source»:»DOI.org (Crossref көрсетілген.

Кесте 1 – Негізгі техникалық көрсеткіштер.

Технология	Көлемдік		Гравиметрикалық		ПӘК, %	Жауап беру уақыты	Разрядталу ұзақтығы
	Қуат тығыздығы, Вт/л	Энергия тығыздығы, Втсағ/л	Қуат тығыздығы, Вт/кг	Энергия тығыздығы, Втсағ/кг			
СЖЭ	0.5-1.5	0.05-2	0.5-3	30-60	65-87	с-мин	1-24ч+
ПЭЖЖ	0.5-10	0.4-20	30-60	-	41-90	1-15 мин	1-24ч+
МЭЖЖ	1к-5к	20-80	400-5000	5-230	90-95	<10 мс	15с-15мин
Pb-Acid	10-700	25-100	75-400	15-50	65-90	<10 мс	<4ч
NaS	150-300	150-300	150-230	100-240	70-90	мс	1-24 ч
NaNiCl <sub>2</sub>	54-500	100-180	150-200	100-447	60-98	<1с	с - часы

ВРБ	0.5-34	10-70	80-160	10-35	60-85	с – 10 мин	<10ч
Ni-Cd	80-600	15-150	100-300	50-300	60-90	20 мс	с-часы
Li-ion	50-5к	150-500	150-2000	75-230	80-98	20мс	мин-часы
ТЭЖЖ	-	80-500	10-50	80-250	30-100	-	1-24+
АМЭЖЖ	300-4к	0,2-13,8	500-2000	1-75	90-98	мс	мс-мин
СКЭЖЖ	1к-10 <sup>5</sup>	1-35	10-10 <sup>6</sup>	0.05-22	85-99	мс	мин-часы
H <sub>2</sub> ЭЖЖ	>500	500-3000	5-800	600-10к	20-66	с-мин	1-24ч+

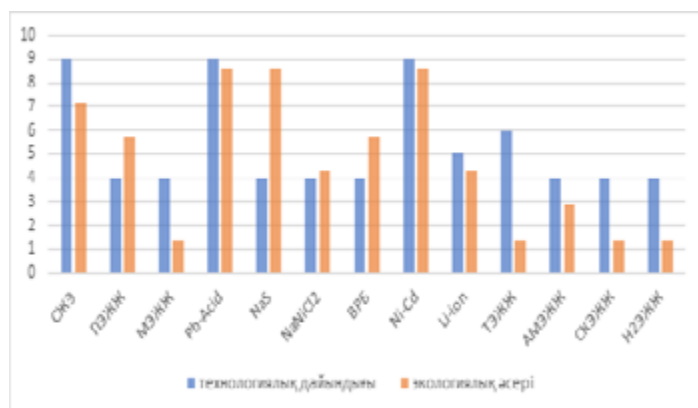
Ванадий редокс – аккумуляторлар ұзақ разрядты (10 сағатқа дейін) және жоғары циклдік жүктемелерге төзімділікті қажет ететін қосымшалар үшін өте қолайлы. 70-85% тиімділігімен және жылдам жауап беру уақытымен (миллисекундтар) ВРБ жаңартылатын энергияны ауқымды сақтау үшін өте қолайлы, дегенмен олардың энергия тығыздығы басқа технологиялармен салыстырғанда төмен [7, 241-б.].

Кесте 2 – қаржылық салымдар көрсеткіші және технологиялық дайындығы.

Технология	Қаржылық салымдар		Жылдық, \$/кВт	Өмір ұзақтығы	Цикл саны	Технологиялық дайындығы
	\$/кВт	\$/кВтч				
СЖЭ	1133-2207	105-511	15-28	40-60	20к-50к	Жетілген техно логия/ комерциализацияланған
ПЭЖЖ	774-1784	16-278	10-19	20-60	500-13к	Даму/ комерциализациялану сатысында
МЭЖЖ	100-1446	500-25к	5-20	15-20	20к-100к	Даму/ ерте комерциализациялану сатысында
Pb-Acid	1214-4100	365-790	4-50	5-15	1370	Жетілген технология/ комерциализацияланған

NaS	380-4к	300-500	7-80	5-20	2500-4000	Даму/ комерциализациялану сатысында
NaNiCl <sub>2</sub>	150-300	100-345	-	10-14	4500	Даму/ комерциализациялану сатысында
ВРБ	600-9000	150-1000	7-70	10-20	>12к	Даму/ ерте комерциализациялану сатысында
Ni-Cd	500-1500	400-2400	20	10-20	2000-3500	Даму/комерциализациялану сатысында
Li-ion	1000-10к	300-2500	6-23	5-15	2800-6000	Даму/комерциализацияланған
ТЭЖЖ	200-2800	4-590	7-43	5-40	-	Даму/ ерте комерциализациялану сатысында
АМЭЖЖ	200-489	1 0 8 5 - 10854	18.5	20-30	20к-100к	Тәжірибеілік демонстрация
СКЭЖЖ	100-480	300-2000	6	20-30	100к-500к	Даму/ ерте комерциализациялану сатысында
H <sub>2</sub> ЭЖЖ	400-2000	1-295	16-24	5-30	1к-10к	Даму/ ерте комерциализациялану сатысында

Никель-кадмий (Ni-Cd) батареялары жұмыс тұрақтылығымен, техникалық қызмет көрсетудің қарапайымдылығымен, шамадан тыс зарядтауға және шамадан тыс зарядтауға төзімділігімен, жақсы төмен температуралық өнімділігімен және беріктігімен ерекшеленеді. Бұл сипаттамалар оларды жаңартылатын энергия өндірісінің өзгеріштігі мен үзілістерін қолдауға қолайлы етеді. Алайда улы кадмийдің болуы қоршаған ортаның жай-күйіне алаңдаушылық туғызады, ластанудың алдын алу үшін дұрыс көдеге жаратуды және қайта өндеуді қажет етеді [8, 511-б.].



Сурет 4 – технологиялық дайындық және экологиялық әсері көрсеткіштері

Кесте 3 – ЭЖЖ технологияларының қызмет түріне қолайлығы.

Технология	Арбитраж	ЖЭК қолдау қосымша қызметтері	ЖЭК шығындарын азайту	Желінің қуатын көтеру	Ж и л і к т і тұрақтандыру	Маусымдық Арбитраж
СЖЭ	+	±	+	+	+	+
ПЭЖЖ	+	±	+	+	+	+
МЭЖЖ	-	+	-	-	+	-
Pb-Acid	ұ	ұ	-	-	ұ	-
NaS	+	+	+	±	+	-
NaNiCl2	+	+	+	±	+	-
ВРБ	±	+	+	±	±	±
Ni-Cd	ұ	ұ	ұ	-	ұ	-
Li-ion	+	+	+	+	+	-
ТЭЖЖ	-	-	+	+	-	+
АМЭЖЖ	-	+	-	-	+	-
СКЭЖЖ	-	+	-	-	+	-
НЭЖЖ	+	±	+	+	±	+

+ - қызметін көрсетуге қолайлығы жоғары  
± - қызметін көрсетуге қолайлығы орташа  
- - қызметін көрсетуге қолайлы емес

Литий-ионды батареялар жоғары энергия және қуат тығыздығымен сонымен қатар жақсы тиімділік көрсеткішімен ерекшеленеді. Жылдам жауап беру уақыты (миллисекундтар) және шығындардың төмендеуі оларды ең жоғары жүктемені төмендетуден бастап жүктемені теңестіруге және жиілікті реттеуге дейін ЖЭК интеграциясының кең ауқымына жарамды етеді. Алайда, оларға алғашқы инвестициялар айтарлықтай және қоршаған ортаға және қауіпсіздікке қауіп төндіреді, соның ішінде улы материалдарды кәдеге жарату, термиялық іске қосу қаупі және жанғыш электролит проблемалары [9, 25-б.].

Энергияны жылу ретінде жинайтын жылу энергиясын сақтау жүйелері 24 сағатқа дейін разрядтау ұзақтығымен ұзақ мерзімді энергияны сақтау үшін тиімді. Тиімділіктің төмендеуіне қарамастан, Тер күн жылу электр станцияларымен біріктірілуі мүмкін, тіпті күн болмаған кезде де тұрақты энергиямен қамтамасыз етіледі.

Асқыноткізгіштік магниттік энергия жинақату жүйелері және суперконденсаторлық энергия жинақтау жүйелері – бұл сөзсіз артықшылықтарға ие энергияны сақтаудың озық технологиялары. АМЭЖЖ жүйелері жоғары тиімділікпен және жылдам жауап беру уақытымен ерекшеленеді, бұл оларды жиілікті басқару сияқты қосымшалар үшін өте қолайлы етеді. Дегенмен, олар күрделі салқындату жүйелерін қажет етеді және капитал құны жоғары.

### Қорытынды

Энергияны жинақтау жүйелерін бағалау кезінде энергетикалық желіге интеграциялау үшін әртүрлі технологиялардың әртүрлі мүмкіндіктері мен күшті жақтарын көрсететін бірнеше негізгі қорытындылар жасауға болады. Су жинақтау электрстанциялары және пневматикалық энергия жинақтау жүйелері жоғары сыйымдылықты және ұзақ мерзімді энергияны сақтау шешімдерін қамтамасыз етеді, әсіресе маусымдық арбитражға және дәстүрлі генерацияны қолдауға жарамды. Олардың тиімділігі нақты географиялық және инфрақұрылымдық жағдайларға байланысты, бұл олардың кең таралуын шектейді.

Литий-ионды батареялар әмбебаптығымен және жылдам жауап беру уақытымен ерекшеленеді, бұл оларды арбитраждан көмекші қызметтерге дейін және қуатты нығайтуға дейін әртүрлі салаларда қолдануға өте ыңғайлы етеді. Дегенмен, ресурстардың қол жетімділігі мен кәдеге жаратылуына

қатысты мәселелер олардың ауқымдылығына және маусымдық арбитраж сияқты кейбір контексттердегі ұзақ мерзімді тұрақтылығына әсер етеді.

Маховикті энергияны жинақтау жүйелері және асқынөткізгіштік магниттік энергия сақтау құрылғылары сияқты мамандандырылған жоғары өнімді технологиялар көмекші қызметтерді ұсыну және электр желісінің тұрақтылығын қамтамасыз ету үшін өте маңызды. МЭЖЖ жиілікті реттеуде және қысқа мерзімді теңгерімде тамаша жұмыс істейді, ал АМЭЖЖ сыйымдылығы мен сақтау ұзақтығының шектеулеріне қарамастан жоғары тиімділік пен жылдам разряд уақытын қамтамасыз етеді.

Натрий-күкірт, натрий-никель-хлорид және ванадий редокс-батареялар әртүрлі қолданбаларда, әсіресе жаңартылатын энергия көздерін қолдауда және қуатты нығайтуда орташа және жоғары өнімділікті көрсетеді. Бұл технологиялар өнімділік пен қолдану арасындағы тепе-теңдікті қамтамасыз етеді, бірақ масштабталуы мен реакция жылдамдығы бойынша литий-ионды батареялармен салыстыруға болмайды.

Қорғасын қышқылды және никель-кадмий батареялары ескірген жүйелер немесе тауашалық қосымшалар үшін қолайлы орташа шешімдер болып табылады, мұнда шығындар бірінші кезектегі міндет болып табылады. Дегенмен, олардың сенімділігі және беріктігі жаңа технологиялардан асып түседі.

Суперконденсаторлар электр қуатының сапасын жақсарту және қолдау қызметтерін ұсыну арқылы қысқа мерзімді қосымшалар үшін жоғары өнімділік мүмкіндіктерін ұсынады. Төмен энергия сыйымдылығын компенсациялау үшін басқа ЭЖЖ құрамында гибриді турде жұмыс істеу көрінеді.

Термиялық энергияны жинақтау жүйелері және Сутегі энергияны жинақтау жүйелері жаңартылатын энергия көздерін біріктіруге арналған инновациялық шешімдер болып табылады. ТЭЖЖ, әсіресе концентраторлық күн энергиясы жүйелерімен үйлескенде, ұзақ мерзімді энергияны сақтау үшін айтарлықтай әлеует ұсынады.

Қорытындылай келе, электр желісіне қосылу үшін ең қолайлы ЭЖЖ таңдау қолданбаның нақты қажеттіліктерін, соның ішінде сақтау ұзақтығын, жауап беру уақытын, масштабталуын және географиялық шектеулерді мұқият қарастыруды қамтитынын атап өткен жөн. Мұнда қарастырылған технологиялардың әрқайсысы қажетті нәтижелер мен операциялық талаптарға негізделген жеке шешімдерді қажет ететін бірегей артықшылықтар мен шектеулерге ие. Зерттеулер мен әзірлемелерді жалғастыру қолданыстағы шектеулерді еңсеру және осы технологияларды қазіргі энергетикалық жүйелерге біріктіру үшін өте маңызды. Өздерінің күшті жақтарын пайдалану

және инновациялар арқылы мәселелерді шешу арқылы ЭЖЖ тұрақты және өміршең энергетикалық болашаққа қол жеткізуде шешуші рөл атқара алады.

## ПАЙДАЛАНЫЛҒАН ДЕРЕКТЕР ТІЗІМІ

1 European White Book on Grid-Connected Storage. European Distributed Energy Resources Laboratories [отчет]. 2011. – 177 б.

2 Energy Storage Applications Summary. European Association for Storage of Energy (EASE) [отчет]. 2020.

3 Symeonidou, M., Giama, E., Papadopoulos, A. Life Cycle Assessment for Supporting Dimensioning Battery Storage Systems in Micro-Grids for Residential Applications // Energies. 2021. - № 19. - Т. 14 – С. 61–89.

4 Liao Q., Sun B., Liu Y., и др. A techno-economic analysis on NaS battery energy storage system supporting peak shaving: Techno-economic analysis; NaS battery; peak shaving // Int. J. Energy Res, 2016. – № 2. – Т. 40 – С. 241–247.

5 Kebede A.A., Kalogiannis T., Van Mierlo J., и др. A comprehensive review of stationary energy storage devices for large scale renewable energy sources grid integration // Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2022. – Т. 159 – С. 112–213.

6 Furquan Nadeem, Nadeem F., S. M. Suhail Hussain, и др. Comparative Review of Energy Storage Systems, Their Roles, and Impacts on Future Power Systems // IEEE Access, 2019. - Т. 7 – С. 4555–4585.

7 Aneke M., Wang M. Energy storage technologies and real life applications – A state of the art review // Applied Energy, 2016. - Т. 179 - С. 350–377.

8 Luo X., Wang J., Dooner M., и др. Overview of current development in electrical energy storage technologies and the application potential in power system operation // Applied Energy, 2015. – Т. 137 – С. 511–536.

9 Viswanathan V., Mongird K., Franks R., и др. 2022 Grid Energy Storage Technology Cost and Performance Assessment. U.S. Department of energy, 2022. – 151 с.

10 Zakeri B., Syri S. Electrical energy storage systems: A comparative life cycle cost analysis // Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2015. – Т. 42 – С. 569–596.

23.09.24 ж. баспаға түсті.

04.12.24 ж. түзетулерімен түсті.

26.02.25 ж. басып шығаруға қабылданды.

\*А. С. Расмұхаметова<sup>1</sup>, М. А. Ергали<sup>2</sup>, К. С. Олжабаева<sup>3</sup>, Б.Ж.Мустағұлова<sup>4</sup>

<sup>1 2 3 4</sup>«Алматынський университет энергетикi и связи имени

Гумарбека Даукеева», Республика Казахстан, г. Алматы

Поступило в редакцию 23.09.24

Поступило с исправлениями 04.12.24

Принято в печать 26.02.25

## СРАВНИТЕЛЬНЫЙ АНАЛИЗ СИСТЕМ НАКОПЛЕНИЯ ЭНЕРГИИ ДЛЯ ИНТЕГРАЦИИ ВОЗОБНОВЛЯЕМЫХ ИСТОЧНИКОВ ЭНЕРГИИ

*В данной статье представлен всесторонний обзор и сравнительный анализ технологий хранения энергии для крупномасштабной интеграции в сети возобновляемых источников энергии. В работе оцениваются различные системы накопления энергии (СНЭ) по техническим, финансовым и экологическим критериям с целью выявления подходящих вариантов для различных сценариев интеграции в энергосистемы. Методологически, технологии накопления энергии классифицируются по способам применения и оцениваются по техническим характеристикам, финансовой жизнеспособности и воздействию на окружающую среду. Механические системы хранения энергии, такие как гидроаккумулирующие станции (ГАЭС), являются зрелыми решениями, обеспечивающими надежность и эффективность, особенно для хранения большего объема энергии. Электрохимические варианты, включая литий-ионные (Li-ion) батареи и ванадиево-редокс батареи (VRB), демонстрируют масштабируемость и плотность энергии, но сталкиваются с проблемами, связанными со стоимостью и экологической устойчивостью. Кроме того, новые технологии, такие как суперконденсаторы и сверхпроводящие индукционные накопители энергии (СПИН), обещают повысить стабильность и устойчивость энергосистемы благодаря быстрому высвобождению большой мощности. Применяя целостный подход, заинтересованные стороны смогут справиться со сложностями интеграции накопителей энергии, способствуя созданию устойчивого и надежного энергетического будущего.*

*Ключевые слова: системы накопления энергии, сетевая интеграция, возобновляемые источники энергии, сравнительный анализ, услуги СНЭ*

\*А. S. Rasmukhametova<sup>1</sup>, M. A. Yergali<sup>2</sup>, K. S. Olzhabayeva<sup>3</sup>, B.Zh.Mustagulova<sup>4</sup>

<sup>1 2 3 4</sup>Almaty University of Power Engineering and telecommunications named

after Gumarbek Daukeev named after G. Daukeev,

Republic of Kazakhstan, Almaty

Received 23.09.24

Received in revised form 04.12.24

Accepted for publication 26.02.25

## COMPARATIVE ANALYSIS OF ENERGY STORAGE SYSTEMS FOR RENEWABLE ENERGY SYSTEMS INTEGRATION

*This paper presents a comprehensive review and comparative analysis of energy storage technologies for large-scale integration into renewable energy grids. The paper evaluates different energy storage systems (ESS) according to technical, financial and environmental criteria in order to identify suitable options for different grid integration scenarios. Methodologically, energy storage technologies are categorised by application mode and evaluated for technical performance, financial viability and environmental impact. Mechanical energy storage systems, such as pumped hydro storage (PHS), are mature solutions that provide reliability and efficiency, especially for storing larger amounts of energy. Electrochemical options, including lithium-ion (Li-ion) batteries, Na-based and vanadium-redox batteries (VRBs), demonstrate scalability and energy density, but face challenges related to cost and environmental sustainability. Furthermore, emerging technologies such as supercapacitors and superconducting magnetic energy storage (SMES) have the potential to enhance grid stability and resilience by rapidly releasing large amounts of power. By adopting a holistic approach, stakeholders can address the complexities of energy storage integration, thereby contributing to the development of a sustainable and reliable energy future.*

*Keywords: energy storage systems, grid integration, renewable energy, comparative analysis, ESS services.*

<https://doi.org/>

**Н.Т. Рустамов<sup>1</sup>, \*О. Д. Меурбекова<sup>2</sup>, Ш. А. Бабахан<sup>3</sup>,  
А. Н. Бергузинов<sup>4</sup>, А. Г. Калтаев<sup>5</sup>**

<sup>1,2,3</sup>Қожа Ахмет Ясауи атындағы Халықаралық қазақ-түрік университеті,  
Қазақстан Республикасы, Түркістан қ.,

<sup>4,5</sup>Торайғыров университеті, Қазақстан Республикасы, Павлодар қ.,

<sup>1</sup>ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-0949-1443>

<sup>2</sup>ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-0949-1443>

<sup>3</sup>ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-7723-0045>

<sup>4</sup>ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-6954-8259>

<sup>5</sup>ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-1684-3347>

\*e-mail: [oksana\\_120183@mail.ru](mailto:oksana_120183@mail.ru)

## **ЖЫЛУ ЖӘНЕ ЭЛЕКТР ЭНЕРГИЯСЫН ӨНДІРУГЕ АРНАЛҒАН ТАРАТЫЛҒАН ЭНЕРГЕТИКАЛЫҚ ЖҮЙЕ**

*Жұмыста энергетикалық желілерді шалғай аймақтар үшін жүргізу мүмкін болмаған кезде когенеративті таратылған генерацияны құру тұжырымдамасы қарастырылған. Жаңаратын энергия көздеріне (ЖЭК) негізделген өндірілетін электр және жылу энергиясының модульдерін жалпы тұрақты ток шинасына біріктіру арқылы когенеративті ток құру мүмкіндігі көрсетілген. Мұндай таратылған генерация (ТГ) жылу және электр энергиясымен үздіксіз қамтамасыз ете алады, және ол ауа-райының қолайсыздығына тәуелді емес. Когенеративті таратылған генерация осы мақалада ұсынылған технологияны қолданған кезде қажетті электр және жылу энергиясымен үздіксіз қамтамасыз ете алады.*

*Таратылған генерацияның міндетті шарты ретінде бір жыл ішінде өндірілетін энергия мөлшері тұтынушыға сол кезеңде қажет болатын энергия мөлшерінен кем болмауы тиіс. Жел электр қондырғылары (ЖЭК), күн батареясы, және тұтынушы арасындағы энергия ағындарын басқару қажеттілігі сыртқы ағындардың – жел мен күннің күйіне қарамастан сенімді және үздіксіз электр энергиясын тұтынуды қамтамасыз ететіні анық. Бұл жұмыста ЖЭК негізінде жұмыс істейтін когенеративті таратылған*

*генерацияны құрудың өзектілігі энергия беру желілерінен алыс объектілерді орталықтандырылған электрмен жабдықтаудан бас тарту мүмкіндігіне байланысты екендігі атап өтілді.*

*Кілтті сөздер: Когенеративтілік, таратылған энергия генерациясы, тұрақты ток шинасы, микрожелі, газтурбиналы генератор, биогаз.*

### **Кіріспе**

Географиялық жағынан шалғайдағы өңірлердің энергетикалық қажеттіліктерін ірі қалалардан жабу үшін осы салаға қолжетімді баламалы энергия көздерін кең көлемде енгізу талап етіледі. Осы өңірлерге энергия беру желісінің әртүрлі түрлерін жүргізу қиын және кейде мүмкін болмағандықтан, осы өңірлерді энергиямен жабдықтауды қамтамасыз етудің оңтайлы түрі ретінде осы мақсат үшін жаңартылатын энергия көздерін (ЖЭК) пайдалану қажет болып табылады. Мұндай ЖЭК күн, жел және биоотын болуы мүмкін.

Модульдік когенеративті гибриді энергия жүйесін құрудың төрт модулі бар: күн энергиясын күн панельдері арқылы пайдалану модулі және өндірілетін электр және жылу энергиясы модулі және электр энергиясын өндіру үшін жел энергиясы модулі пайдаланылады. электр энергиясын өндіру және газ түрінде отын энергиясын өндіру үшін биоотын ауа-райына қарамастан осы аймақтардың қажеттіліктері үшін үздіксіз энергия өндіруді қамтамасыз етеді [1, 17–19-бб.].

Сондықтан жергілікті шалғай өңірлер үшін қуаты аз гибриді энергетикалық жүйелерді құру сұранысқа ие. Мұндай энергетикалық жүйе, атап өткендей, модульдік ерекшеліктерге ие болуы керек. Бұл мәселенің әлеуметтік-экономикалық жақтарын да ұмытпау керек.

Модульдік гибриді энергия жүйесінің «таза» күн технологиясымен салыстырғанда негізгі артықшылықтары:

– потенциалдың, өндірілген энергия түрінің ауа-райына аз тәуелділігі, яғни жоғары сенімділік;

– экономикалық рентабельділік.

Бұл жұмыстың мақсаты үздіксіз электр, жылу энергиясымен қамтамасыз ететін және ауа-райының қолайсыздығына тәуелсіз ЖЭК негізінде жұмыс істейтін модульдік когенеративті гибриді энергия жүйесін құру технологиясын әзірлеу болып табылады.

Материалдар мен әдістер

Соңғы жылдары жоғары технологиялардың даму қарқыны айтарлықтай өсті. Жаңартылатын энергия көздері энергетиктердің, физиктердің, ғалымдар мен саясаткерлердің назарында болды. Осыған байланысты ЖЭК пайдалану технологиясының күшейтілген әзірлемелері басталды. ЖЭК пайдалануды

гибридтеу осы саладағы перспективалы және тиімді технологиялардың бірі болып табылады. Осы ойларға сүйене отырып, ЖЭК–ген энергияның әртүрлі түрлерін бір уақытта алуға мүмкіндік бар. Бұл жерде осы энергияны алу және оны жинақтау технологиясында қиындықтар туындайды. Модульдік гибриді энергия жүйесін құру технологиясын әзірлеу ауа–райына қарамастан бір мезгілде электр және жылу энергиясын алуға мүмкіндік береді. Негізінен, мұндай технология таратылған генерация (ТГ) технологиясы деп аталады [2, 114–116-бб.].

Анықтама бойынша ТГ мүмкіндігі барлық орталықтандырылған генераторлық қуат желілерінен тәуелсіз, жергілікті тұтынушыларға олардың көлемі мен тұтыну профилі бойынша нақты сұраныстарын ескере отырып, электр энергиясын өндіруге ғана емес, сонымен қатар жылу энергиясын өндіруге арналған [3, 220–224-бб.].

Шалғай аймақтардағы энергияға мұқтаж тұтынушыларды үздіксіз энергиямен қамтамасыз етуде туындайтын мәселелерді шешуде модульдік когенеративті таратылған генерацияны енгізудің негізгі проблемасы осы модульдердің синхронды жұмысын ұйымдастыру болып табылады. Өйткені жел мен күннен энергия өндіретін модуль ауа–райының «қолайсыздығынан» өте тәуелді. Ал жылу энергиясын өндіретін модуль когенеративті режимде жұмыс істеуі керек. Екінші жағынан, мұндай токтардың жұмысын бақылаудың тиімділігі көбінесе энергия өндіретін құрылғының құрылымдық құрылымына байланысты болады. Егер мұндай дизайн әртүрлі ЖЭК негізінде жұмыс істейтін модульдерден тұрса, онда энергия қуатын бағалау осындай модульдердің есептік және математикалық моделін әзірлеуді және тұтастай алғанда когенеративтілік режимінде жұмыс істейтін ТГ жүйесінің математикалық моделін әзірлеуді талап етеді [4, 692–695-бб.]. ЖЭК–ті қолданатын когенеративті режимде жұмыс істейтін гибриді таратылған генерация жүйесін дамыту өте өзекті болып табылады және бүгінде сұранысқа ие болып саналады.

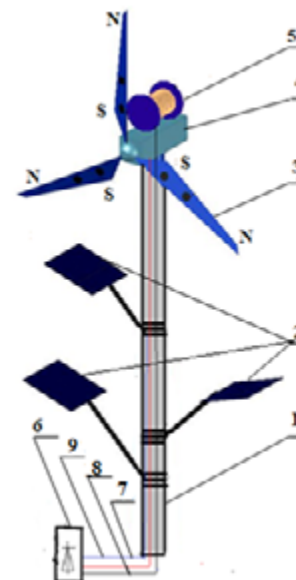
Қойылған мақсатқа жетпес бұрын, біз ТГ жүйесінде электр және жылу энергиясын өндіретін модульдерді таңдауымыз керек.

Ұсынылған ТГ когенеративті жүйесі төрт модульдің конъюгациясынан тұрады.

Модуль 1 гибриді желді орнату арқылы электр энергиясын өндіретін 1–суретте көрсетілген.

Гибриді жел қондырғысы (сурет 1), тұрақты және айнымалы электр энергиясын өндіретін дінгек 1, күн панельдері 2, магниттік қалақшалар 3, асинхронды қозғалтқыш 4, индукциялық катушка 5, контроллер 6 тұрады [5, 59–65-бб.].

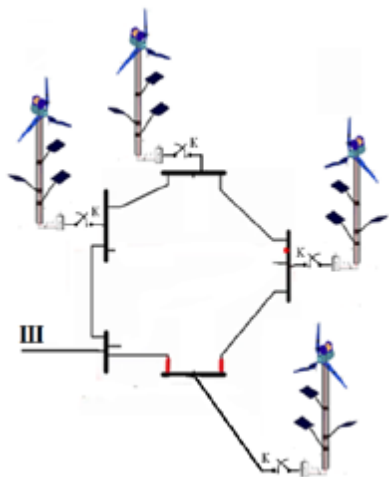
Гибриді ЖЭК келесі принцип бойынша жұмыс істейді (сурет 1). Желдің әсерінен магниттік қалақшалар 3, асинхронды қозғалтқыш 4 көмегімен 7 айнымалы электр тогын шығарады және айналасында магнит өрісін тудырады, ол индукциялық катушкалардың орамдарын тесіп өтіп, индукциялық ток 8 шығарады. Күн панельдерінде өндірілген 9 тұрақты ток 2 контроллер 6 арқылы 2–суретте көрсетілген микрожеліге беріледі [6, 629–635-бб.].



Сурет 1 – Гибриді жел энергетикалық қондырғысы (ЖЭУ) (пайдалы модельге ҚР патенті № 7391)

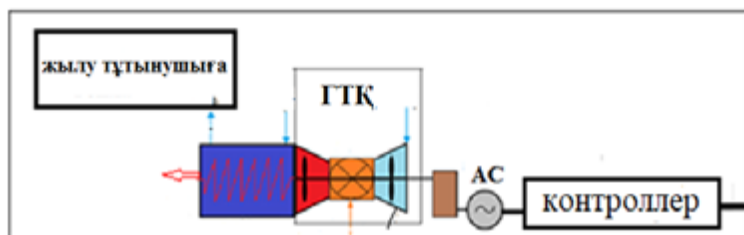
Осы ЖЭК негізінде біз 2–суретте көрсетілген микрожеліні жасаймыз. Бұл микрожеліге гибриді ЖЭК–ны жеткілікті мөлшерде қосуға болады. Өндірілген электр энергиясы осы гибриді ЖЭК–ның микрожелі шинасына беріледі. Ал осы желіден қажетті электр энергиясы шинаға беріледі. Мұндай байланыстың артықшылығы айқын.





Сурет 2 – Гибридті ЖЭС микрожелісі

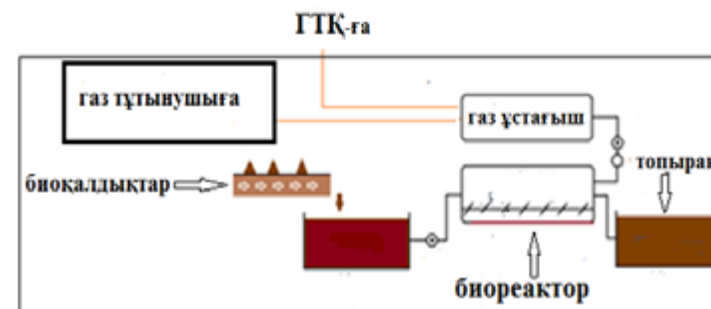
Газ турбиналық генератордың көмегімен электр және жылу энергиясын өндіретін 2–ші модуль 3–суретте көрсетілген [7, с.83–90]. Бұл модуль келесідей жұмыс істейді. Газбен жұмыс істейтін газ турбиналық қозғалтқыш (ГТҚ) электр энергиясын өндіреді. Пайдаланылған газ су батареясы арқылы өткеннен кейін сыртқа шығарылады. Осылайша, су батареясында жылу энергиясы пайда болады. Контроллер арқылы өндірілген электр энергиясы ток шинасына беріледі [8, 29–37-бб.].



Сурет 3 – Жылу және электр энергиясын өндіретін модуль (Пайдалы модельге ҚР патенті № 6070)

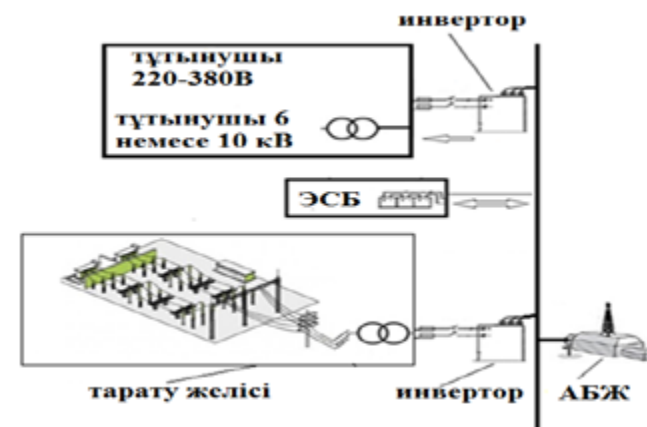
3–ші модуль биогазды газ турбиналық қозғалтқыштың жұмыс істеуі үшін отын ретінде және тұтынушы үшін отын ретінде өндіру 4–суретте көрсетілген

[9, 323–339-бб]. Бұл модуль келесідей жұмыс істейді. Биологиялық қалдықтар биогаз және жылыжай топырағы өндірілетін биореакторға беріледі. Өндірілген биогаздың бір бөлігі газ турбиналық қозғалтқышқа, бір бөлігі газ тұтынушыға беріледі.



Сурет 4 – Биогаз және жылыжай топырағын шығаратын модуль

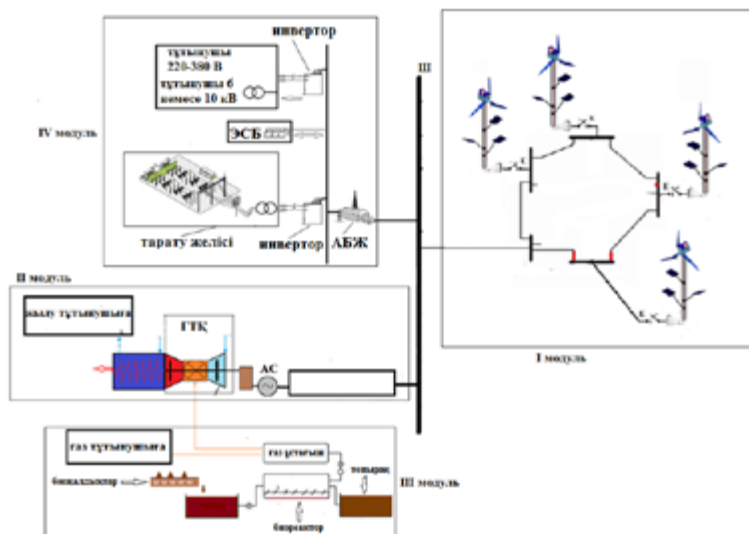
Когенеративті ТГ өндірілген электр энергиясын бөлу және жүйенің жұмысын басқарудың 4–ші модулі 5–суретте көрсетілген [10, 10–18-бб.]. Бұл модуль келесідей жұмыс істейді. Барлық өндірілген электр энергиясы жалпы тұрақты ток шинасына беріледі. Әмбебап инверторлардың көмегімен тарату желісі жақын жердегі орталықтандырылған желіге немесе тұтынушыға беріледі. Қалған электр энергиясы энергия жинақтаушы бағына ЭЖБ-де жиналады. Автоматты басқару жүйесі электр энергиясының осы процесін басқарады.



Сурет 5 – Өндірілген электр энергиясының таралуын басқару модулі

Осы модульдер негізінде біз ЖЭҚ–те жұмыс істейтін және тұтынушылар үшін газ түрінде электр, жылу және отын шығаратын когенеративті ток жасаймыз.

6–суретте ұсынылған ТГ когенеративті энергетикалық жүйесі көрсетілген. Бұл жүйе келесідей жұмыс істейді. 1–модуль үш түрлі электр тоғын шығарады (сурет. 1). Бұл токтар тұрақты токқа ауысып, жалпы шинаға беріледі.



Сурет 6 – ТГ когенерация режимінде жұмыс істейді (Пайдалы модельге патент № 7970)

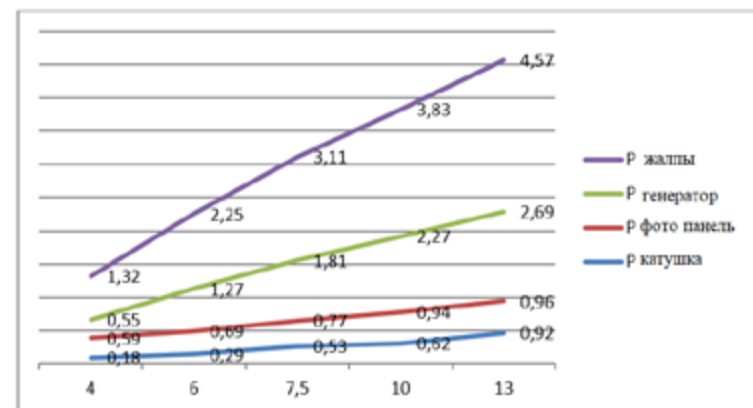
2–ші модуль күн және жел энергиясы болмаған жағдайда электр энергиясының үздіксіз өндірілуін қамтамасыз етуге арналған. Жылу энергиясы мен газдың қажеттілігіне байланысты автоматтандырылған басқару жүйесі осы модульді іске қосады. 3–ші модульде ауыл шаруашылығы және мал шаруашылығы қалдықтарынан биогаз өндіру арқылы биореакторда 2–ші модульге берілетін биогаз өндіріледі. Бір бөлігі тұтынушыға отын энергиясы түрінде беріледі. Электр энергиясы когенеративті токтың жалпы шинасында орналасқан, 4–ші модуль арқылы тұтынушыларға тарату процесі жүзеге асырылады [11, 47–58-бб.].

### Нәтижелер және талқылау

6–суретте көрсетілген модельдік қондырғыда газ турбиналы қозғалтқыштың мөлшері 30x14x14, салмағы 10кг, 1л биогазды пайдалану кезінде бір уақытта 3,3 кВт/сағ электр энергиясы мен 3500 ккал жылу өндірілді. Бұл жағдайда жылу батареясының мөлшері 2x2x3 болды. Үшін гибриді уау мұнда пышақтың диаметрі 4,7м, а күн панелі 1м2, катушканың ұзындығы 1м, катушканың диаметрі 0,5м болса, біз келесі нәтижелерге қол жеткіздік. Тәжірибеде бір ЖЭҚ жұмыс істеді. Ал, когенеративті ТГ жұмыс істеген бір сағат ішінде келесі нәтижелер алынды. 7–суретте 1–ші және 2–ші модульдерде электр энергиясын өндіру кестесі көрсетілген. 1–кестеде желдің әртүрлі жылдамдығында бір сағатқа жел–күн энергетикалық қондырғысының (ЖКЭҚ) нәтижелері көрсетілген.

Кесте – 1

V қуат	(м/с)	4	6	7,5	10	13
P катушка	(Вт)	0,18	0,29	0,53	0,62	0,92
P фото панелдер	(Вт)	0,59	0,69	0,77	0,94	0,96
P генератор	(Вт)	0,55	1,27	1,81	2,27	2,69
P жалпы	(Вт)	1,32	2,25	3,11	3,83	4,57



Сурет – 7 Жел–күн электр қондырғысының (ЖКЭҚ) генераторының электр энергиясын өндіруі желдің жылдамдығынан тәуелділік графигі

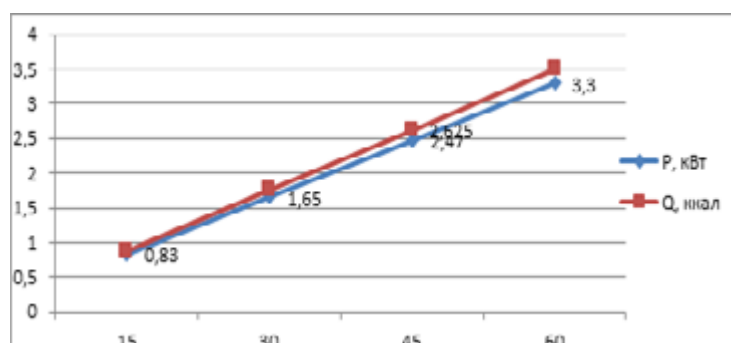
Жоғарыда айтылғандарды ескере отырып, асинхронды генератор таңдау кезінде ең оңтайлы шешім алынды. Себебі құны бойынша асинхронды генераторлар арзан, сонымен қатар құрастыру өте оңай. Генератор ретінде

біз АИР56А4 типті генераторын таңдаймыз, мұндағы қуат  $P = 0,12$  кВт, айналым саны  $n=1500$  айн/мин, ток күші  $I=0,5$  А, кернеу  $U=240$  В.

Іл биогазды пайдаланған кезде тұрақты жұмыс сағатына 3,3 кВт электр энергиясын және бір уақытта 3500 ккал жылу өндірді. Электр және жылу энергиясын алу газ бен ауаның берілуімен бақыланады. Егер сіз 30л үлкен тұрмыстық цилиндрді қолдансаңыз, онда біз 30–35 сағаттық жұмыс циклімен шамамен 95 кВт электр энергиясын аламыз және жергілікті температураға байланысты 330x103 ккал жылу аламыз.

Кесте – 2

t, мин	P, кВт	Q, ккал
15	0,83	0,875
30	1,65	1,750
45	2,47	2,625
60	3,3	3,500



Сурет – 8 Электр энергиясы мен пайдалы жылудың биогаз көлеміне тәуелділігі

Қорытынды. Когенеративті ТГ тұтынушыны осы жұмыста ұсынылған технологияны қолданған кезде қажетті электр және жылу энергиясымен қамтамасыз ете алады. Алгоритмді іске асыруға арналған басқару құрылғысында генераторлардың параметрлеріне сәйкес келетін динамикалық параметрлер болуы керек.

Бөлінген генерацияның міндетті шарты – бір жылда өндірілетін энергия мөлшері тұтынушы сол кезеңде алған энергия мөлшерінен кем болмауы керек. ВЭУ, күн батареясы, батарея және тұтынушы арасындағы энергия ағындарын басқару қажеттілігі айқын, бұл сыртқы ағындардың – жел мен күннің күйіне тәуелсіз сенімді және үздіксіз электр қуатын тұтынуды

қамтамасыз етеді. Қазіргі заманғы электроника электр энергиясының параметрлерін ауыстыруға және түрлендіруге қабілетті, бірақ оны басқару үшін автоматтандырылған басқару жүйесінің жұмысын қамтамасыз ететін алгоритм қажет.

## ПАЙДАЛАНЫЛҒАН ДЕРЕКТЕР ТІЗІМІ

1 **Есенов, Е., Колупаев, Н.** Малая распределённая энергетика и ВИЭ [Текст] // Энергетика. – №1 (72). – 2020. – С. 17–19, [www.kazenergy.kz](http://www.kazenergy.kz)

2 **Рустамов, Н. Т.** О создании гибридных энергетических систем, использующих возобновляемые источники энергии (ВИЭ) [Текст] // Вестник Национальной инженерной академии Республики Казахстан. – 2014. – № 4 (54). – С. 114–116.

3 **Рустамов, Н. Т., Меирбекова, О. Д., Бабахан, Ш.** Гибридная энергостанция работающая на базе возобновляемой энергии. – Ташкент. «Новые горизонты низкоуглеродного развития в мире и Узбекистане» [Текст] // Аннотации международной научно-технической конференции. – 2022. – С. 220–224.

4 **Рустамов, Н. Т., Меирбекова, О. Д., Исроилов, Ф. М.** Устройства распределенной когенерации энергии–Джиззах [Текст] // Материалы Международной научно-технической конференции «Инновационные решения технических, инженерно-технологических задач производств». – 2022. – С. 692–695.

5 **Бабахан, Ш., Рустамов, Н. Т.** Повышение эффективности ветроустановок [Текст] // Проблемы информатики и энергетики. – № 4. – 2020. – С. 59–65.

6 **Rustamov, N., Babakhan, Sh., Genc, N., Kibishov, A., Meirbekova, O.** An Improved Hybrid Wind Power Plant for Small Power Generation [Text] // International journal of renewable energy research N, Vol.13. – No.2. – June, 2023. – P. 629– 635.

7 **Меирбекова, О. Д., Рустамов, Н. Т.** К вопросу создания гибридных энергетических систем [Текст] // Журнал «Проблемы информатики и энергетики», Ташкент. – 2022. – №3. – С. 83–90.

8 **Rustamov, N., Meirbekova, O., Kibishov, A., Babakhan, Sh., Berguzinov, A.** Creation of a hybrid power plant operating on the basis of a gas turbine engine [Text] // Eastern-European Journal of Enterprise Technologies ISSN 1729–3774. – № 2/8 (116). – 2022. – P. 29–37.

9 **Рустамов, Н. Т., Бергузинов, А. Н., Меирбекова, О. Д., Тулебаева, Г. А.** Математическая модель основанная на передаточной функции системы

распределенной генерации [Текст] // Вестник Торайғыров университет. ISSN 2710–3420. Серия энергетическая. – 2024. – № 2. – С. 323–339.

10 **Rustamov, N. T., Babakhan, S. A., Tulebayeva, G. A., Kakharman, A. K.** Management of Power Generation by a Distributed Generation Micro Grid [Text] // European Journal of Technical and Natural Sciences – 2024. – № 2. – P. 10–18. <https://doi.org/10.29013/EJTNS-24-2-10-18>.

11 **Арифжанов, А. Ш., Захидов, Р. А.** Схемотехнические решения подключения автономных источников энергии на базе возобновляемых источников энергии в общую распределительную сеть [Текст] // Проблемы информатики и Энергетики. – 2017. – № 6. – С. 47–58.

#### REFERENCES

1 **Esenov, E., Kolupaev, N.** Malaya raspredelyonnaya energetika i VIE [Small distributed energy and renewable energy sources] [Text] // Energetika. – 2020. – № 1(72). – P. 17–19.

2 **Rustamov, N. T.** O sozdaniy gibridnyh energeticheskikh sistem, ispol'zuyushchih vozobnovlyayemye istochniki energii (VIE) [On the creation of hybrid energy systems using renewable energy sources (RES)] [Text] // Vestnik Nacional'noj inzhenernoj akademii Respubliki Kazahstan. – 2014. – № 4(54). – P. 114–116.

3 **Rustamov, N. T., Meirbekova, O. D., Babahan, SH.** Gibridnaya energostanciya rabotayushchaya na baze vozobnovlyayemoj energii. – Tashkent. «Novye gorizonty nizkouglerodnogo razvitiya v mire i Uzbekistane» [Hybrid power plant operating on renewable energy. – Tashkent. «New horizons of low-carbon development in the world and Uzbekistan»] [Text] // Annotacii mezhdunarodnoj nauchno–tekhnicheskoy konferencii. – 2022. – P. 220–224.

4 **Rustamov, N. T., Meirbekova, O. D., Isroilov, F. M.** Ustrojstva raspredelennoj kogeneraciya energii. – Dzhizzah [Distributed energy generation devices – Jizzakh] [Text] // Materialy Mezhdunarodnoj nauchno–tekhnicheskoy konferencii «Innovacionnye resheniya tekhnicheskikh, inzhenerno–tekhnologicheskikh zadach proizvodstv». – 2022. – P. 692–695.

5 **Babahan, SH., Rustamov, N. T.** Povyshenie effektivnosti vetroustanovok [Improving the efficiency of wind turbines] [Text] // Problemy informatiki i Energetiki. – 2020. – № 4. – P. 59–65.

6 **Rustamov, N., Babakhan, Sh., Genc, N., Kibishov, A., Meirbekova, O.** An Improved Hybrid Wind Power Plant for Small Power Generation [Text] // International journal of renewable energy research. – 2023. – Vol.13. – No.2. – P. 629– 635.

7 **Meirbekova, O. D., Rustamov, N. T.** K voprosu sozdaniya gibridnyh energeticheskikh sistem [On the issue of creating hybrid energy systems] [Text] // Zhurnal «Problemy informatiki i energetiki», Tashkent. – 2022. – № 3. – P. 83–90.

8 **Rustamov, N., Meirbekova, O., Kibishov, A., Babakhan, Sh., Berguzinov A.** Creation of a hybrid power plant operating on the basis of a gas turbine engine [Text] // Eastern–European Journal of Enterprise Technologies ISSN 1729–3774. – 2022. – № 2/8(116). – P. 29–37.

9 **Rustamov, N. T., Berguzinov, A. N., Meirbekova, O. D., Tulebaeva, G. A.** Matematicheskaya model' osnovannaya na peredatochnoj funkcii sistema raspredelennoj generacii [Mathematical model based on the transfer function of a distributed generation system] [Text] // Vestnik Torajgyrov universitet. ISSN 2710–3420. Seriya energeticheskaya. – 2024. – № 2. – P. 323–339.

10 **Rustamov, N. T., Babakhan, S. A., Tulebayeva, G. A., Kakharman, A. K.** Management of Power Generation by a Distributed Generation Micro Grid [Text] // European Journal of Technical and Natural Sciences. – 2024. – № 2. – P. 10–18. <https://doi.org/10.29013/EJTNS-24-2-10-18>.

11 **Arifzhanov, A. SH., Zahidov, R. A.** Skhemotekhnicheskie resheniya podklyucheniya avtonomnyh istochnikov energetiki na baze vozobnovlyayemyh istochnikov energii v obshuyu raspredelitel'nyuyu set' [Circuit solutions for connecting autonomous energy sources based on renewable energy sources to the general distribution network] [Text] // Problemy informatiki i Energetiki. – 2017. – № 6. – P. 47–58.

18.11.24 ж. баспаға түсті.

ж. түзетулерімен түсті.

10.03.25 ж. басып шығаруға қабылданды.

*Н. Т. Рустамов<sup>1</sup>, \*О. Д. Меирбекова<sup>2</sup>, Ш. А. Бабахан<sup>3</sup>,*

*А. Н. Бергузинов<sup>4</sup>, А. Г. Калтаев<sup>5</sup>*

<sup>1,2,3</sup>Международный казахско–турецкий университет

имени Ходжи Ахмеда Ясави, Республика Казахстан, г. Туркестан,

<sup>4,5</sup>Торайғыров университет, Республика Казахстан, г. Павлодар,

Поступило в редакцию 18.11.24

Поступило с исправлениями

Принято в печать 10.03.25

### **РАСПРЕДЕЛЕННАЯ ЭНЕРГЕТИЧЕСКАЯ СИСТЕМА ДЛЯ ВЫРАБОТКИ ТЕПЛОВОЙ И ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ ЭНЕРГИИ**

*В работе рассматривается концепция создания когенеративной распределенной генерации (РГ) для отдаленных регионов, куда трудно или невозможно провести энергетические линии. Показано, что объединяя модули, вырабатываемые электрические и тепловые энергии, на базе альтернативных источников энергии (ВИЭ), на общую шину постоянного тока, возможно создать когенеративной РГ. Что интересно, такая РГ непрерывно обеспечивая тепловой и электрической энергией потребителя, не зависит от капризов погоды. Когенеративная РГ имеет возможность обеспечить потребителя необходимым потоком электрической и тепловой энергией при использовании предложенной в работе технологии.*

*В качестве обязательного условия выделенной генерации предусмотрено, что количество вырабатываемой энергии за год должно быть не менее количества энергии, получаемой потребителем за тот же период. Потребность в управлении потоками энергии между ВЭУ, солнечной батареей, батареей и потребителем очевидна, что, как было показано, обеспечивает надежное и непрерывное потребление электроэнергии независимо от состояния внешних потоков – ветра и солнца.*

*В работе отмечается, что актуальность создания когенеративной РГ, работающей на базе ВИЭ, обусловлена возможностью отказа от централизованного электроснабжения объектов, удаленных от линий энергопередач.*

*Ключевые слова: Когенеративность, распределенная генерация энергии, шина постоянного тока, микросеть, газотрубинный генератор, биогаз.*

*N. T. Rustamov<sup>1</sup>, \*O. D. Meirbekova<sup>2</sup>, Sh. A. Babakhan<sup>3</sup>,*

*A. N. Berguzinov<sup>4</sup>, A. G. Kaltayev<sup>5</sup>*

<sup>1,2,3</sup>Akhmet Yassawi International Kazakh–Turkish University,

Republic of Kazakhstan, Turkistan,

<sup>4,5</sup>Toraighyrov University, Republic of Kazakhstan, Pavlodar

Received 18.11.24

Received in revised form

Accepted for publication 10.03.25

### **DISTRIBUTED ENERGY SYSTEM FOR GENERATING HEAT AND ELECTRICITY**

*The paper considers the concept of creating a cogenerative distributed generation (RG) for remote regions where it is difficult or impossible to draw energy lines. It is shown that by combining the modules generated electrical and thermal energy, based on alternative energy sources (RES), on a common DC bus, it is possible to create a cogenerative RG. Interestingly, such an RG does not intermittently provide heat and electric energy to the consumer and does not depend on the vagaries of the weather. The cogenerative RG has the ability to provide the consumer with the necessary flow of electrical and thermal energy using the technology proposed in the work.*

*As a prerequisite for dedicated generation, it is stipulated that the amount of energy produced per year must be at least the amount of energy received by the consumer over the same period. The need to manage energy flows between wind turbines, solar panels, batteries and consumers is obvious, which has been shown to ensure reliable and continuous electricity consumption regardless of the state of external flows – wind and sun.*

*The paper notes that the relevance of creating cogenerative RGS operating on the basis of renewable energy sources is due to the possibility of abandoning centralized power supply to facilities remote from power transmission lines.*

*Keywords: Cogeneration, distributed energy generation, DC bus, microgrid, gas turbine generator, biogas.*

<https://doi.org/>

**B. Sarsembayev<sup>1</sup>, A. Mubarak<sup>2</sup>, A. Arinova<sup>3</sup> \*G. Kalimuldina<sup>4</sup>**

**<sup>1</sup>Astana IT University, Republic of Kazakhstan, Astana**

<sup>1,2,3,4</sup>Nazarbayev University, Republic of Kazakhstan, Astana

<sup>1</sup>ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-1087-4436>

<sup>2</sup>ORCID: <https://orcid.org/0009-0003-3126-5378>

<sup>3</sup>ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-7780-4555>

<sup>4</sup>ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-9185-3217>

\*e-mail: [gkalimuldina@nu.edu.kz](mailto:gkalimuldina@nu.edu.kz)

## **EVALUATING STRUCTURE AND POWER CONVERTING CIRCUITS FOR HYBRID TRIBOELECTRIC AND PIEZOELECTRIC NANOGENERATOR**

*A hybrid nanogenerator integrates both triboelectric and piezoelectric components into a single device. By doing so, it can harness energy from different types of mechanical inputs more efficiently. When the hybrid nanogenerator is subjected to mechanical motion, both triboelectric and piezoelectric effects are activated. For example, when pressing or sliding motions occur, the triboelectric layers produce a charge due to contact and separation, while the piezoelectric material generates a charge from the mechanical stress applied. The combined effect can produce higher electrical output and improve the efficiency of energy harvesting from a broader range of mechanical motions. In this paper, the novel structure of hybrid triboelectric and piezoelectric nano-generators have been merged to harvest abundant mechanical energy. Ecoflex and PVDF-based hybrid nanogenerator have been proposed to harvest mechanical energy. While Ecoflex synthesized with 0.5 % hexachlorofullerene (C<sub>60</sub>Cl<sub>6</sub>) is used for the triboelectric layer in the TENG part, 3wt% polymethyl methacrylate (PMMA) integrated with polyvinylidene fluoride (PVDF) matrix is utilized as a dielectric medium in piezoelectric part of the nanogenerator. Efficient hybrid nanogenerator structures were selected and appropriate power converters were used. The hybrid NG's performance in generating electrical microenergy was demonstrated experimentally.*

*Keywords: hybrid nanogenerator, triboelectric nanogenerator, piezoelectric nanogenerator, mechanical energy harvesting, dielectric medium, power converter circuit.*

### **Introduction**

With the swift expansion of the industrial economy and the global population, traditional energy sources like fossil fuels are increasingly inadequate to satisfy energy requirements. The adoption of renewable and sustainable energy sources, including light, heat, wind, wave, vibration, and rotational energy, emerges as a viable and promising strategy to address the worldwide energy crisis [1]. Over the past decade, extensive research and efforts have focused on environmental energy harvesting techniques. These sources generate large-scale electricity for industrial and household use, alleviating local power shortages. Simultaneously, microscale energy harvesting has gained global attention for replacing batteries in portable electronics and wireless sensor nodes, enabling self-charging devices and self-powering smart wireless sensor network systems [2].

These energy harvesters capture ambient renewable energy and convert it into electricity using various transduction mechanisms, including photovoltaic, thermoelectric, pyroelectric, piezoelectric, electromagnetic, and triboelectric methods, offering sustainable power solutions [3].

Most renewable energy sources in our environment are not consistently stable or available. Because a single harvester's energy output depends on the source's availability, it often cannot meet the power needs of electronic devices. Hybrid energy harvesting technology is emerging as a solution to the energy insufficiency of single harvesters. It involves collecting energy from multiple sources and converting it into electricity through various transduction mechanisms. This approach, using hybrid materials, structures, and mechanisms, enhances energy conversion efficiency and benefits from multiple energy sources simultaneously. Multi-source hybrid energy harvesters with diverse energy conversion materials and configurations have been consequently developed as integrated devices [4].

The output power increases significantly when multiple energy sources are available simultaneously or alternately. Despite this, the development of high-efficiency power conversion from single-source harvesters and various transduction mechanisms remains a primary research focus. Technical reviews on piezoelectric [5], electromagnetic [6], triboelectric [2], thermoelectric [7], pyroelectric, and hybrid mechanisms have covered materials, theories, configurations, and applications [8]. Due to their irregular high-voltage, low-current pulse output, TENGs typically have low energy supply efficiency when powering electronics or charging storage devices, limiting their practical use in self-powered microsystems. Therefore, effective power management is crucial

to enhance the energy efficiency of TENGs [3]. Self-powered applications using NGs have grown rapidly, particularly in biomedical fields. Implantable TENGs have proven effective for human-machine interfaces and wearable devices for monitoring physical activities. Recent studies indicate that TENGs can generate electricity from various mechanical energies, including water waves, sound, and traffic noise. While TENGs generate high voltages and low currents, PENGs produce low voltages and medium currents [9] the high impedance of the TENG cannot meet the low impedance requirement of electronic devices. TENG devices need efficient and secure power management solutions to overcome the issue. Recently, different power management techniques with matched impedance and regulated output power have been proposed to efficiently utilize a TENG as a power source. These power management techniques include direct current (dc). Both have low power outputs and therefore require efficient power management circuits for hybrid TENG/PENG.

There have been several studies devoted for designing of the hybrid triboelectric and piezoelectric nanogenerators to harvest mechanical energy. The flexible nanogenerator using P(VDF-TrFE) nanofibers and a PDMS/MWCNT composite membrane, operating through separate triboelectric and piezoelectric hybrid mechanisms has been proposed [10]. P(VDF-TrFE) nanofibers, created via electrospinning, serve as both a piezoelectric functional layer and a triboelectric friction layer. Multiwall carbon nanotubes (MWCNTs) were added to PDMS films to enhance the triboelectric generator's performance by increasing initial capacitance. The nanogenerator was fabricated using low-cost MEMS processes. Another study suggests that a hybridized triboelectric-piezoelectric-electromagnetic nanogenerator may efficiently harvest vibration energy [11]. The device integrates three energy harvesting modes into a single unit, with a magnetic levitation structure as its core component. This design might potentially offer higher sensitivity compared to conventional spring or cantilever systems, due to reduced energy loss, making it suitable for capturing small vibrations, such as those from a slapping desk or a running car. Additionally, the design may help prevent mechanical fatigue or damage, although further validation is necessary to confirm these benefits. A hybrid piezo/triboelectric nanogenerator (H/P-TENG) was designed for mechanical energy harvesting using polymer ceramic composite films, specifically PDMS/BZT-BCT and PVA. The H/P-TENG, incorporating 15 wt% forward-poled BZT-BCT in PDMS, showed a 190% performance increase over a TENG made from pure PDMS [12]. Finally, Hybrid nanofiber mats were created using poly(vinylidene fluoride) and thermoplastic polyurethane as piezoelectric and triboelectric materials through simultaneous electrospinning [13]. When subjected to periodic compression, these hybrid nanogenerators showed a 75.0% increase in voltage density and a 169.23% increase in current density due

to surface roughening. Additionally, the decoration with rGO NPs and ZnO NWs further boosted voltage density by 271.80% and current density by 230.77%. A piezoelectric/triboelectric hybrid nanogenerator (PT-NG) was developed using a composite film of electrospun PVDF nanofibers embedded in PDMS [14]. This design enhances mechanical-to-electrical energy conversion while protecting the PVDF during compression. The PT-NG efficiently charges capacitors and performs well as a self-powered wearable sensor, capable of detecting finger movements, recognizing gestures, and monitoring respiration.

The power management module must match the impedance of electronic devices with a hybrid TENG/PENG and regulate its output for steady power. DC buck conversion, capacitive transformation, rectification, electromagnetic transformation, IC switches, voltage trigger switches, travel switches, and transistor switches have been adopted for efficient power conversion, the techniques are not efficient and straightforward though [2].

Recent studies have been devoted on polymer-based TENG and PENG, highlighting their use as both energy harvesters and self-powered sensors [15]. Generally, TENGs convert mechanical energy into electrical energy through the combined effects of contact electrification and electrostatic induction. This mechanism allows TENGs to harvest energy from various mechanical motions in the environment. On other hand, PENGs utilize the piezoelectric effect to convert mechanical energy into electrical energy, serving as energy harvesters, and detect mechanical stimuli to generate electrical signals, functioning as self-powered sensors [16]. Both devices can be combined to improve the power density of the sources.

In this paper, the Ecoflex and PVDF-based hybrid nanogenerator has been proposed to harvest mechanical energy. While Ecoflex synthesized with 0.5% hexachlorofullerene (C<sub>60</sub>Cl<sub>6</sub>) is used for the triboelectric layer in the TENG part, 3wt% polymethyl methacrylate (PMMA) integrated with polyvinylidene fluoride (PVDF) matrix is utilized as a dielectric medium in piezoelectric part of the nanogenerator. Efficient hybrid nanogenerator structures were selected and appropriate power converters were used. The hybrid NG's performance in generating electrical microenergy was demonstrated experimentally.

## Materials and methods

### A. Hybrid NG structures

The structures for hybrid nanogenerators are fabricated with synthesized dielectric materials with improved triboelectric properties and their chemical and electrical characteristics have been presented in previous studies [15], [16]. Four structures of the hybrid nanogenerators (NG) as well as PENG and TENG have been presented below (Figure 1). The hybrid NG consists of triboelectric and piezoelectric components. The structure-1 was fabricated such that Ecoflex/

flurelene 5 wt% was attached to the top electrode (N1) while PVDF/PMMA 3 wt% was placed between electrodes N2 and N3 (Figure 1a). The contact and separation of electrodes N1 and N2 represent a triboelectric component, and the deformation of dielectric material between N2 and N3 operates as a piezoelectric component. Similarly, the structure-2 of the hybrid NG is fabricated such that in triboelectric component PVDF/PMMA 3 wt% is attached to N1 and polyvinyl alcohol (PVA) 15 wt% is attached to N2 (Figure 1b). In the piezoelectric component, Ecoflex/flurelene 5 wt% is placed between the electrodes N2 and N3. The structure -3 of hybrid NG is fabricated such that the triboelectric component's electrode N1 is attached with Ecoflex/flurelene 5 wt% and N2 attached with PVA 15 wt% (Figure 1c). The piezoelectric component's electrodes have Ecoflex/flurelene 5 wt% between N2 and N3. Structure-4 of the hybrid NG is fabricated similarly to structure-1 but N2 is attached with PVA 15 wt% in the triboelectric component (Figure 1d). The structure of TENG consists of the electrode N1 attached with PVA 15 wt%, and Ecoflex/flurelene 5 wt% attached to N2 (Figure 1e). The structure of PENG consists of PVDF/PMMA 3 wt% placed between the electrodes N1 and N2.

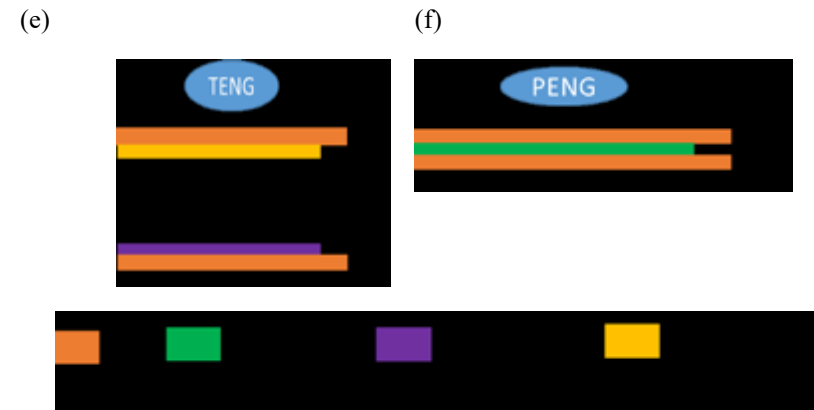
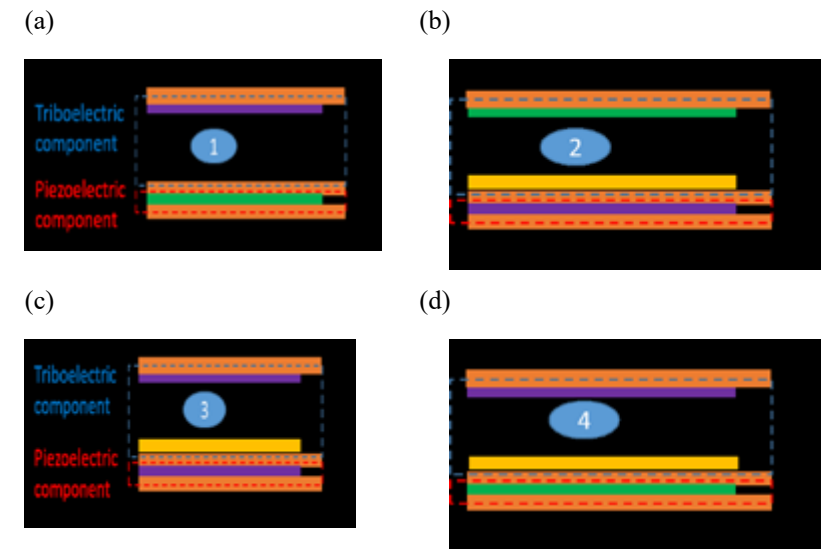


Figure 1 –The fabrication structures of the hybrid NGs (a) structure -1, (b) structure -2, (c) structure – 3, (d) structure -4, (e) TENG structure, (f) PENG structure

Deriving and applying electromechanical equations for a hybrid NG is complex, especially when the components' motions are closely linked. A general system of equations for a hybrid NG combines piezoelectric and triboelectric principles, particularly applying Maxwell's law of displacement current, but varies across the piezoelectric and triboelectric domains [17]:

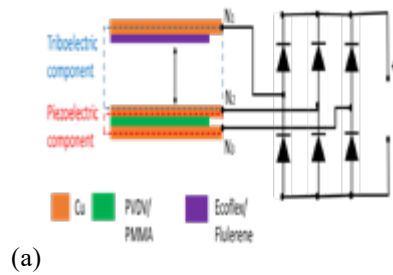
where  $d$  is the separation distance between the triboelectric layers or the distance inside the piezoelectric material;  $Q_s$  is the surface polarization charge density on the piezoelectric material;  $Q_f$  is the surface density of free electrons accumulated in the electrodes of the triboelectric material;  $t_1$  and  $\epsilon_1$  are the thickness and dielectric constants of two dielectrics of the triboelectric pair;  $V$  are the output voltage downstream of the piezoelectric and the triboelectric device;  $f(V, I)$  is a function that involves the output voltages and currents of the piezoelectric and triboelectric components and which depend on the specific configuration and electrode connections.

#### B. Power converters for hybrid NG

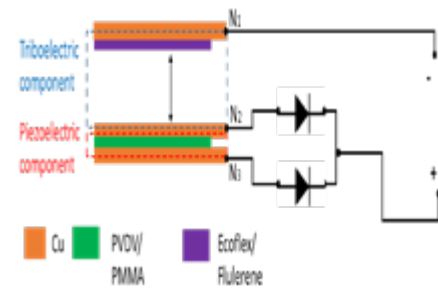
The power converters' topologies are presented and assessed according to their performances measured from the output side. The first converter's topology (connection-1) represented a three-phase full-bridge rectifier connected to N1, N2 and N3 electrodes (Figure 2a). The second topology (connection-2) represents half-wave rectification with two diodes, anode sides connected to N2 and N3 (Figure 2b). The third topology (connection-3) has two full-bridge rectifiers connected in parallel (Figure 2c). The final topology (connection-4) has two full-bridge rectifiers connected in series (Figure 2d). Inputs of the first



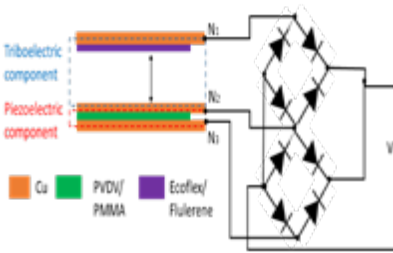
full-bridge connected to N1 and N2, and the second full-bridge rectifier’s inputs connected to N2 and N3. It should be noted converter’s topology for TENG and PENG consists one full bridge rectifier as it utilized in [15] and [16].



(a)



(b)



(c)

(d)

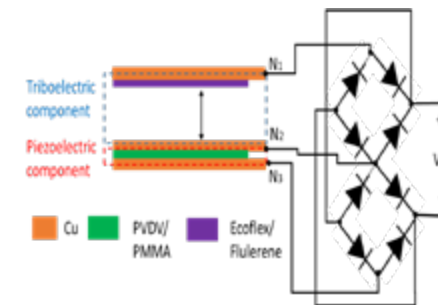


Figure 2 – Power converters connections: (a) connection – 1, (b) connection- 2, (c) connection -3, (d) connection- 4

### Results and discussion

This section presents the electrical characteristics for harvesting mechanical energy by hybrid NG for analysis. The performance of the designed hybrid NG (structure-1) has been measured with an oscilloscope in contact separation mode (5 Hz and 10 N) and compared with PENG and TENG performance. The connection-1 power converter’s topology was utilized in this test. The open-circuit voltage and short-circuit current diagrams are shown in Figure 3 and Figure 4. The maximum values of the PENG, TENG, and Hybrid NG output voltages reach 10.8 V, 5.28 V, and 6 V respectively. However, the mean value of the voltage of Hybrid NG is the highest, 0.5905 V which is higher by 23% and 22.3% from TENG and PENG voltages respectively. The maximum values of the PENG, TENG, and Hybrid NG currents reach 1.24  $\mu\text{A}$ , 0.536  $\mu\text{A}$ , and 0.42  $\mu\text{A}$  respectively. However, the mean value of the current of Hybrid NG is the highest, 0.0534  $\mu\text{A}$  which is higher by 72.8% and 13.9% from TENG and PENG voltages respectively (Table 1). Moreover, the Hybrid NG demonstrates the maximum charge transfer compared to PENG and TENG (Figure 5). For example, the Hybrid NG has generated 1.84  $\mu\text{C}$  which is higher by 8.65% and 291.4% than TENG and PENG respectively. Similarly, the performance of the Hybrid NGs has been analyzed by considering their structures which are presented in the previous section. The output voltages of the Hybrid NGs are presented in Figure 6. Structure-4 has the best performance than other structures. For example, it has reached 45 V with 5.9579  $\mu\text{C}$  charge transfer which is improved by 61.4%, 879.6%, and 8.52% than structure-1, structure-2, and structure-3 respectively (Table 2). This has shown that Structure-4 is a better

configuration for power generation. Next, the power converters have been tested for efficiency and minimal losses. The maximum output voltage has reached 67 V with 2 half-bridge rectifiers whereas 25 V with a three-phase rectifier which is higher by 38.9% and 108.3% than with connections 3 and 4 (Figure 7).

Table 1 – The output voltages and currents of the Hybrid NG

Type of NG	, V	, V	, mA	, mA
TENG	5.28	0.48	0.536	0.0309
PENG	10.2	0.483	1.24	0.0469
Hybrid NG	6	0.591	0.42	0.0534

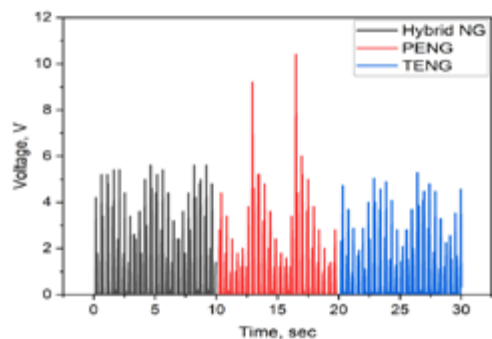


Figure 3 – Hybrid NG’s output voltage after full-wave rectification at 5 Hz and 10 N

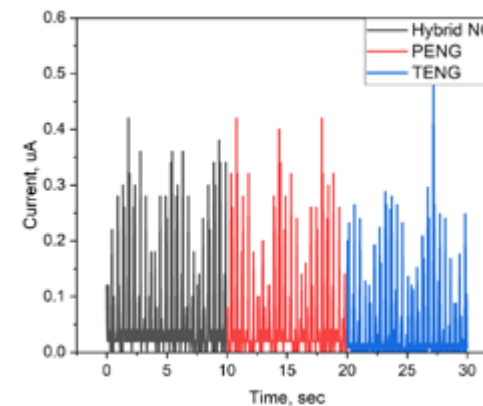


Figure 4 – Hybrid NG’s output current after full-wave rectification at 5 Hz and 10 N

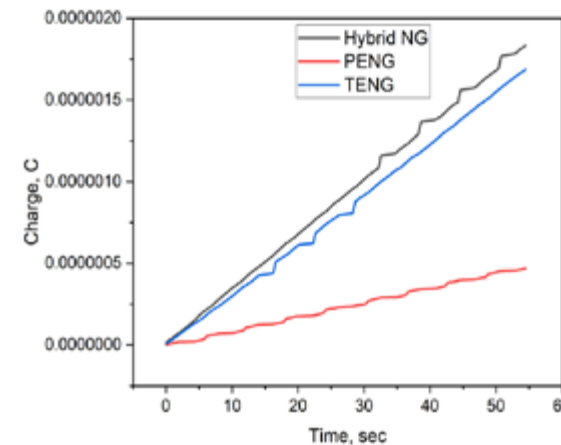


Figure 5 – Hybrid NG’s charge generation within 55 sec at 5 Hz and 10 N

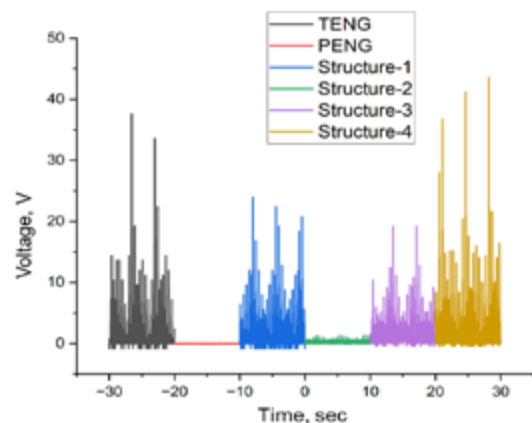


Figure 6 – Hybrid NG’s output voltages with structures 1, 2, 3, and 4

Table 2 – Hybrid NG’s maximum output voltages and maximum charges with structures 1, 2, 3, and 4

Parameter	TENG	PENG	Structure -1	Structure -2	Structure -3	Structure -4
Maximum output voltage, V	39.2	0.18	24	1.44	21.6	46.8
Maximum Charge, $\mu\text{C}$	5.222	0.033216	3.6912	0.60819	5.4902	5.9579

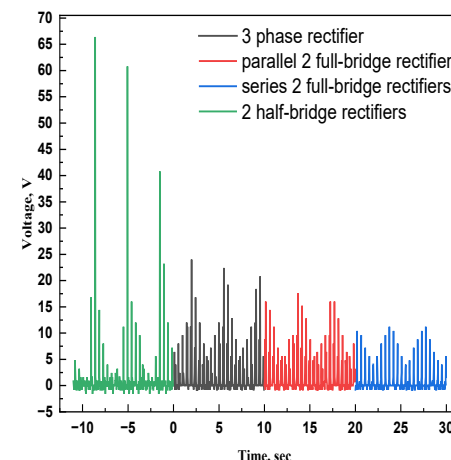


Figure 7 – Hybrid NG’s output voltages with power converter connections 1, 2, 3, and 4 types

### Conclusions

In this paper, a novel hybrid structure combining triboelectric and piezoelectric nanogenerators was developed to harvest abundant mechanical energy. Polymers-based hybrid nanogenerators were proposed for this purpose. Specifically, Ecoflex with 0.5% hexachlorofullerene was used for the TENG’s triboelectric layer, while a 3wt% polymethyl methacrylate integrated with a polyvinylidene fluoride matrix served as the dielectric medium for the piezoelectric part. Efficient hybrid nanogenerator structures were selected by evaluating performance with varying dielectric layers attached to the designated electrodes and appropriate power converters were utilized. The maximum power generation of the hybrid nanogenerator as well as demonstration of its practical application are planned as the future steps and will be presented in upcoming study.

### Acknowledgements

This research was supported by the research projects AP14869428 from the Ministry of Education and Science of the Republic of Kazakhstan and 20122022FD4135 from Nazarbayev University.

## REFERENCES

- 1 **Liu, H., Fu, H., Sun, L., Lee, C., Yeatman, E. M.** Hybrid energy harvesting technology: From materials, structural design, system integration to applications [Text] // *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. – 2021. – Vol. 137, N 110473. – P. 1–25.
- 2 **Luo, J. Wang, Z. L.** Recent progress of triboelectric nanogenerators: From fundamental theory to practical applications [Text] // *EcoMat*. – 2020. – Vol. 2, N 4. – P. 1–22.
- 3 **Fang, C.** Overview of Power Management for Triboelectric Nanogenerators [Text] // *Advanced Intelligent Systems*. – 2020. – Vol. 2, N 1900129. – P. 1–17.
- 4 **Zhang, T., Yang, M., Zhang, C., Bowen, R., Yang, Y.** Recent Progress in Hybridized Nanogenerators for Energy Scavenging [Text] // *iScience*. – 2020. – Vol. 23, N 101689. – P. 1–16.
- 5 **Briscoe, J., Dunn, S.** Piezoelectric nanogenerators – a review of nanostructured piezoelectric energy harvesters [Text] // *Nano Energy*. – 2015. – Vol. 14, P. 15–29.
- 6 **Carneiro, P. M. R. et al.** Instrumented electromagnetic generator: Optimized performance by automatic self-adaptation of the generator structure [Text] // *Mechanical Systems and Signal Processing*. – 2022. – Vol. 171, N 108898. – P. 1–22.
- 7 **Xie, L., Zhai, N., Liu, Y., Wen, Z., Sun, X.** Hybrid Triboelectric Nanogenerators: From Energy Complementation to Integration [Text] // *Research*. – 2021. – Vol. 2021, N 9143762. – P.1-23.
- 8 **Pang, Y., Cao, Y., Derakhshani, M., Fang, Y., Wang, Z. L., Cao, C.** Hybrid Energy-Harvesting Systems Based on Triboelectric Nanogenerators. [Text] // *Matter*. – 2021. – Vol. 4, N 1. – P. 116–143.
- 9 **Begum, S. R., Chandrasekhar, A.** Opportunities and Challenges in Power Management Systems for Triboelectric Nanogenerators [Text] // *ACS Appl. Electron. Mater*. – 2023. – Vol. 5, N 3. – P. 1347–1375.
- 10 **Wang, X., Yang, B., Liu, J., Zhu, Y., Yang, C., He, Q.** A flexible triboelectric-piezoelectric hybrid nanogenerator based on P(VDF-TrFE) nanofibers and PDMS/MWCNT for wearable devices [Text] // *Sci. Rep*. – 2016. – Vol. 6, N 36409. – P.1–10.
- 11 **He, J. et al.** Triboelectric-piezoelectric-electromagnetic hybrid nanogenerator for high-efficient vibration energy harvesting and self-powered wireless monitoring system [Text] // *Nano Energy*. – 2018. – Vol. 43, P. 326–339.
- 12 **Gopal, S. R., Velayutham, T. S., Gan, W. C., Cheong, J. Y., Soh, A. E.** A hybrid piezoelectric and triboelectric nanogenerator with lead-free BZT–BCT/

- PDMS composite and PVA film for scavenging mechanical energy [Text] // *RSC Adv*. – 2023. – Vol. 13, N 12. P. 7921–7928.
- 13 **Faruk, Ü. Ö., Bedeloğlu, A. Ç.** Three-Dimensional Piezoelectric–Triboelectric Hybrid Nanogenerators for Mechanical Energy Harvesting [Text] // *ACS Appl. Nano Mater*. – 2023. – Vol. 6, N 16. – P. 14656–14668.
- 14 **Chen, Q. et al.** Hybrid Piezoelectric/Triboelectric Wearable Nanogenerator Based on Stretchable PVDF–PDMS Composite Films [Text] // *ACS Appl. Mater. Interfaces*. – 2024. – Vol. 16, N 5. – P. 6239–6249.
- 15 **Kakim, A. et al.** Incorporating MIL-125 Metal-Organic Framework for Flexible Triboelectric Nanogenerators and Self-Powered Sensors for Robotic Grippers [Text] // *Advanced Sensor Research*. – 2024. – N 2300163. – P. 1-11.
- 16 **Mubarak, A. et al.** Quenched PVDF / PMMA Porous Matrix for Triboelectric Energy Harvesting and Sensing [Text] // *Energy & Environmental Materials*. – 2024. – N e12808. – P. 1–10.
- 17 **Mariello, M.** Recent Advances on Hybrid Piezo-Triboelectric Bio-Nanogenerators: Materials, Architectures and Circuitry [Text] // *Nanoenergy Advances*. – 2022. – Vol. 2, N 1. – P. 64–109.

Received 20.08.24

Received in revised form 06.01.25

Accepted for publication 11.03.25

*Б. К. Сарсембаев<sup>1</sup>, Ә. Мубарак<sup>2</sup>, А. Аринова<sup>3</sup> \*Г. С. Калимулдина<sup>4</sup>*<sup>1</sup>Астана ІТ университеті, Қазақстан Республикасы, Астана қ.<sup>1,2,3,4</sup>Назарбаев Университеті, Қазақстан Республикасы, Астана қ.

20.08.24 ж. баспаға түсті.

06.01.25 ж. түзетулерімен түсті.

11.03.25 ж. басып шығаруға қабылданды.

### ГИБРИДТІ ТРИБОЭЛЕКТРЛІК ЖӘНЕ ПЬЕЗОЭЛЕКТРЛІК НАНОГЕНЕРАТОРЛАРҒА АРНАЛҒАН ҚҰРЫЛЫМДЫ ЖӘНЕ ҚҰАТТЫ ТҮРЛЕНДІРЕТІН СҰЛБАЛАРДЫ БАҒАЛАУ

*Гибридті наногенератор трибоэлектрлік және пьезоэлектрлік компоненттерді бір құрылымға біріктіреді. Осылайша, ол механикалық кірістердің әртүрлі түрлерінен энергияны тиімдірек пайдалана алады. Гибридті наногенератор механикалық қозғалысқа ұшыраған кезде трибоэлектрлік және пьезоэлектрлік әсерлер белсендіріледі. Мысалы, басу немесе сырғанау қозғалыстары пайда болғанда, трибоэлектрлік қабаттар жанасу және бөлу салдарынан заряд жасайды, ал*

пьезоэлектрлік материал қолданылған механикалық кернеуден заряд жасайды. Біріктірілген әсер электр қуатын жоғарылатып, механикалық қозғалыстардың кең ауқымынан энергия жинау тиімділігін арттырады. Бұл мақалада гибриді трибоэлектрлік және пьезоэлектрлік наногенераторлардың жаңа құрылымы механикалық энергияны жинау үшін біріктірілді. Механикалық энергияны жинау үшін Ecoflex және поливинилиденді фторидпен (PVDF) негізіндегі гибриді наногенератор ұсынылды. TENG бөлігіндегі трибоэлектрлік қабат үшін 0,5% гексахлорфуллеренмен (C<sub>60</sub>C<sub>16</sub>) синтезделген Ecoflex пайдаланылса, диэлектриктік ортаның диэлектрлік ортасы ретінде PVDF біріктірілген массалық 3% полиметилметакрилат (PMMA) қолданылады. Тиімді гибриді наногенератор құрылымдары таңдалып, сәйкес қуат түрлендіргіштері пайдаланылды. Гибриді наногенераторының электрлік микроэнергияны өндірудегі өнімділігі эксперименталды түрде көрсетілді.

*Кілтті сөздер:* гибриді наногенератор, трибоэлектрлік наногенератор, пьезоэлектрлік наногенератор, механикалық энергия жинау, диэлектрлік орта, қуат түрлендіргіш тізбегі.

Б. К. Сарсембаев<sup>1</sup>, А. Мубарак<sup>2</sup>, А. Аринова<sup>3</sup> \*Г.С. Калимулдина<sup>4</sup>

<sup>1</sup>Astana IT University, Республика Казахстан, г. Астана

<sup>1,2,3,4</sup>Назарбаев Университет, Республика Казахстан, г. Астана

Поступило в редакцию 20.08.24

Поступило с исправлениями 06.01.25

Принято в печать 11.03. 25

## **ОЦЕНКА СТРУКТУРЫ И СХЕМ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЕЙ ЭНЕРГИИ ДЛЯ ГИБРИДНОГО ТРИБОЭЛЕКТРИЧЕСКОГО И ПЬЕЗОЭЛЕКТРИЧЕСКОГО НАНОГЕНЕРАТОРА**

Гибридный наногенератор объединяет трибоэлектрические и пьезоэлектрические компоненты в одном устройстве. Благодаря этому он может более эффективно генерировать энергию от различных типов механических входов. Когда гибридный наногенератор подвергается механическому воздействию движения, активизируются как трибоэлектрические, так и пьезоэлектрические эффекты. Например, когда происходят движения нажатия или скольжения, трибоэлектрические слои производят заряд из-за контакта и разделения, в то время как пьезоэлектрический

материал производит заряд из-за приложенного механического напряжения. Совместный эффект может производить более высокий электрический выход и повышение эффективности сбора энергии из более широкого диапазона механических движений. В этой статье новая структура гибридных трибоэлектрических и пьезоэлектрических наногенераторов была объединена для сбора обильной механической энергии. Гибридный наногенератор на основе Ecoflex и поливинилиденфторида (PVDF) было предложено собирать механическую энергию. В то время как Ecoflex, синтезированный с 0,5 % гексахлорфуллерена (C<sub>60</sub>C<sub>16</sub>), используется для трибоэлектрического слоя в части TENG, 3 % полиметилметакрилата (PMMA), интегрированного с матрицей PVDF, используется в качестве диэлектрического слоя в пьезоэлектрической части наногенератора. Были выбраны эффективная конструкция гибридного наногенератора и использованы соответствующие преобразователи мощности. Экспериментально продемонстрирована эффективность гибридного наногенератора для получения электрической микроэнергии.

*Ключевые слова:* гибридный наногенератор, трибоэлектрический наногенератор, пьезоэлектрический наногенератор, сбор механической энергии, диэлектрический слой, схема преобразователя мощности.

<https://doi.org/>

**\*Ж. Қ. Сейдулла<sup>1</sup>, М. С. Исатаев<sup>2</sup>, Р. Қ. Манатбаев<sup>3</sup>,  
А. Қ. Ершина<sup>4</sup>, С. Додаев<sup>5</sup>**

<sup>1,2,3,5</sup>Қазақский национальный университет имени аль-Фараби,

Республика Казахстан, г. Алматы

<sup>4</sup>Қазақский национальный женский педагогический университет,

Республика Казахстан, г. Алматы

<sup>1</sup>ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-0413-6557>

<sup>2</sup>ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-8248-670X>

<sup>3</sup>ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-2151-2606>

<sup>4</sup>ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-6811-3904>

<sup>5</sup>ORCID: <https://orcid.org/0009-0006-0357-4618>

\*e-mail: [Zhanibek.seidulla@kaznu.edu.kz](mailto:Zhanibek.seidulla@kaznu.edu.kz)

## **ТІК ОСЬТІ ЖЕЛ ҚОНДЫРҒЫСЫНА АРНАЛҒАН СИММЕТРИЯЛЫ ЕМЕС ПІШІНДІ ҚАЛАҚШАЛАРДЫҢ АЭРОДИНАМИКАСЫН ЗЕРТТЕУ**

*Бұл жұмыста аэродинамикалық құбырда жүргізілген симметриялы емес пішінді қалақшалардың тәжірибелік нәтижелері қарастырылады, ондағы ағын жылдамдығы мен атқылау бұрыштарының әртүрлі мәндерінде көтеру күші мен маңдайлық кедергі коэффициенттері зерттелді.*

*Нәтижелер симметриялы емес формадағы қалақтар атқылау бұрыштары 180°-тан 210°-қа дейінгі аралықта көтеру күші мен маңдайлық кедергі коэффициенттерінің ең жоғары мәндеріне жететінін көрсетті, бұл талдауға сәйкес коэффициенттер  $C_x = 1,68$  және  $C_y = 3,45$  құрады. Бұл деректер қалақшалардың төменгі жел жылдамдығында жоғары тиімділігін көрсетеді, бұл оларды орнынан қозғалу мәселесінің сипаттамалары мен жоғары қуат өндіру маңызды болып табылатын жел энергетикалық қондырғыларында (ЖЭҚ) қолдану үшін перспективалы етеді.*

*Алынған нәтижелер симметриялы емес қалақтары бар роторлардың дизайнын одан әрі жетілдіру үшін пайдаланылуға мүмкіндік береді, бұл олардың орнынан қозғалу сипаттамаларын жақсартуға және қуат коэффициентін арттыруға көмектеседі.*

*Бұл зерттеу жел электр қондырғыларының конструкциясы мен пайдалану параметрлерін оңтайландыру бойынша ұсыныстар әзірлеуге ықпал етеді, бұл өз кезегінде олардың сенімділігі мен экономикалық тиімділігін арттыруы мүмкін. Осылайша, жұмыс жел энергетикасы саласындағы білімді кеңейтуге және әртүрлі аймақтардың энергетикалық инфрақұрылымына ЖЭҚ-ты кеңінен енгізуге ықпал ететін технологияларды әзірлеуге бағытталған.*

*Кілтті сөздер: орнынан қозғалту мәселесі; атқылау бұрышы; симметриялы емес пішінді қалақшалардың аэродинамикасы; маңдайлық кедергі коэффициенті; көтеру күші.*

### **Кіріспе**

Соңғы онжылдықтарда көмірқышқыл газы шығарындыларын азайту мен тұрақты дамудың жаһандық қажеттілігіне байланысты жаңартылатын энергияға деген қызығушылық айтарлықтай өсті. Жел энергетикасы осы саладағы ең перспективалы бағыттардың бірі ретінде зерттеушілер мен инженерлердің назарын аударады. Атап айтқанда, тік айналу осі бар жел қондырғылары әртүрлі бағыттардан желмен жұмыс істеу қабілетіне және әртүрлі географиялық жағдайларда пайдалану әлеуетіне байланысты айтарлықтай қызығушылық тудырады.

Дегенмен, ЖЭҚ бірқатар техникалық сын-қатерлермен ұштасады, олардың арасында жел энергетикалық қондырғысының орнынан қозғалту мәселесі ерекше орын алады. Мақалада аэродинамикалық өнімділік және симметриялы емес қалақшалардың аэродинамикалық сипаттамалары зерттелді. Көтеру өнімділігін жақсарту және жел электр қондырғыларының (ЖЭҚ) жалпы тиімділігін арттыру үшін жаңа қалақша конструкцияларын әзірлеуге баса назар аударылды. Жақында зерттелген тұжырымдамалардың ішінде Савониус пен Дарье роторларының элементтерін қамтитын аралас дизайны ерекше назар аударуға тұрарлық. Мұндай гибрид желдің әртүрлі жылдамдықтарында Дарье роторлары үшін орнынан қозғалту мәселесін шешуді ұсынады және дәстүрлі Савониус роторларымен салыстырғанда жақсартылған қуат көрсеткіштерін көрсетеді. Зерттеудің бұл бағыты жел қондырғыларының тиімділігі мен сенімділігін арттыру үшін айтарлықтай перспективалар береді [1, 81-б.].

Batista және бірлескен авторлар төмен жел жылдамдығында орнынан қозғалуға мүмкіндік беретін Дарье типті тік осьті жел турбиналары үшін жаңа қалақ профилін әзірледі. Бұл әзірleme тік осьті айналымы бар жел турбиналарының өнімділігі мен пайдалы әсер коэффициентін арттыруға бағытталған, бұл турбиналардың негізгі мәселелерінің бірін шешеді [2, 193 -б.].

Sayed және бірлескен авторлар CFD ортасын пайдалана отырып, жел турбинасы қалақтарының аэродинамикалық өнімділігін зерттеді, атап айтқанда әртүрлі жел жағдайында олардың тиімділігін оңтайландыру үшін әртүрлі қалақ профильдерін талдады. Әр түрлі зерттеушілер Дарье турбинасының орнынан қозғалуы мәселесін шешудің әртүрлі тәсілдерін ұсынды. Жұмыста қарапайым орнынан қозғалту мәселесін және тиімділікті арттыру үшін Савониус пен Дарье технологияларының үйлесімі туралы зерттеу ұсынған, бағыттаушы қалақшалардың пайдалануды жұмыс авторлары зерттеді, қалақшалардың көлбеу бұрышын оңтайландырудың механикалық жүйелерін қолдану зерттелген, сондай-ақ айналу кезінде пішінін өзгертетін мамандандырылған қалақшалар, ұқсас аэродинамикалық профиль ұсынылған [3, 11–12 -бб.]. Бұл әзірлемелердің барлығы белгілі бір қиындықтарға тап болады: кейбір модельдерді жасау өте қиын және тұрақты қолдауды қажет етеді, ал басқалары орнынан қозғалу моментінің жоғарылауына қарамастан жұмыс ауқымында және максималды тиімділікте шектеулі. Дегенмен, аэродинамикалық пішіндегі симметриялық емес немесе қисық қалақшалардың пайдалану тамаша бастапқы өнімділікті қамтамасыз ететін дизайн үшін перспективалы болып табылады.

Дегенмен, мұндай құрылымдар кеңістік шектеулі қалалық жерлерде өндіру және орнату үшін тым күрделі. Бұрын жел турбиналарының өздігінен іске қосылу сипаттамаларын жақсарту әрекеттері жасалды, негізінен қалақтардың тығыздығы, қалақтардың қисаюы мен қалыңдығы, қалақтардың ығысу бұрышы және қалақшаның алға қарай еңіс бұрышы және т.б. сияқты статикалық геометриялық параметрлерді оңтайландыруға бағытталған. Орнынан қозғалтуды жақсарту үшін ұсынылған басқа тәсілдерге көлбеу жүздерді, икемді желкендерді, айнымалы қадамды және т. б. Reddy және авторлар көмекші қалақшалармен жабдықталған тік айналу осі жел турбинасы роторының тиімділігіне сандық және эксперименттік зерттеу жүргізді [4, 1913 – 1929 -бб.].

Зерттеу барысында NASA 4415 және NASA 0021 қалақ профильдерін пайдалана отырып, тік айналу осі жел турбиналарының аэродинамикалық тиімділігі зерттелді. Зерттеуде ағын параметрлері, мысалы, жылдамдық пен атқылау бұрышы әр түрлі болды. Эксперименттік нәтижелер көрсеткендей, NASA 4415-тің максималды көтеру коэффициенті NASA 0021-ге қарағанда жоғары. Сонымен қатар, ағынның бұзылуы NASA 4415 үшін  $16^\circ$  және NASA 0021 үшін  $18^\circ$  атқылау бұрышында байқалады [5, 451 – 459 -бб.]. Желдің төмен жылдамдығы (5,0 және 6,0 м/с) жағдайында NASA 63415 қалақ профилі бар симметриялық емес Дарье роторының тиімділігін арттыру (орнынан қозғалу мәселесі және динамикалық өнімділік) үшін қалақша бұрышының ( $\square$ ) әсері эксперименталды түрде зерттелді. Қалақшалардың көлбеу бұрышын теріс

мәннен оң мәнге өзгерту ротордың жұмысын айтарлықтай жақсартатыны анықталды [6, 981 – 997 -бб.].

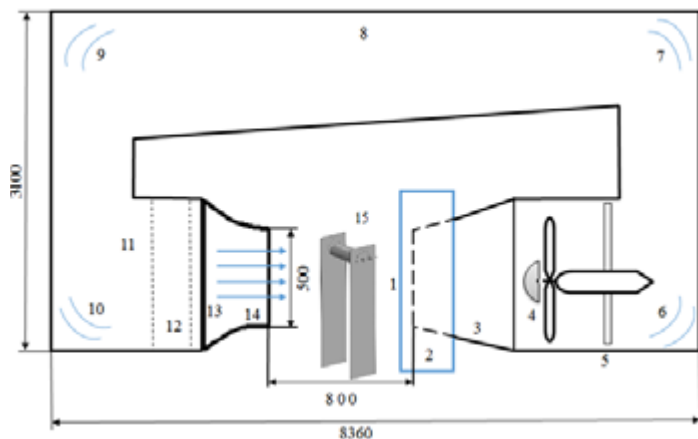
Ротордың ықшамдылығының (0,8-ден 1,2-ге дейін) және жел жылдамдығының әртүрлі мәндерінде симметриялық емес S1210 қалақшалары бар үш қалақшалы Дарье роторының тиімділігін зерттеді. Желдің төмен жылдамдығы жағдайында орнынан қозғалу сипаттамаларына, статикалық және динамикалық моментке және қуат коэффициентіне (Cr) басты назар аударған. Зерттеу ротордың жоғары жинақылығы оның жалпы өнімділігін жақсартатынын көрсетті. Максималды (Cr) қол жеткізілетін ротордың оңтайлы ықшамдығы 1,0 құрайды, ал Cr=0,32 максималды мәні 5,7 м/с жел жылдамдығында алынды. Сондай-ақ симметриялы және симметриялы емес қалақшалары бар Дарье роторларымен салыстыру қарастырылған, бұл ротордың су айдау немесе ұнтақтау сияқты шағын көлемді қолданбалар үшін жарамды екенін көрсетеді, жұмыс ауқымының қысқарғанына қарамастан жоғары моментті қажет етеді [7, 381 – 387 -бб.].

Желдің төмен жылдамдығы (4, 6 және 8 м/с) жағдайында Дарье роторының бастапқы өнімділігі мен жалпы тиімділігіне қалақша профилінің әсері туралы зерттеулер келтірілген [8, 536 – 547 -бб.]. Қалақшалардың үш түрін салыстыруға баса назар аударылған: екі симметриялық емес (S815 және EN0005) және бір симметриялы (NASA0018). Тәжірибелік зерттеулер орталықтан тепкіш желдеткіштің көмегімен үш қалақты Дарье роторында жүргізілді. Ағынның біркелкі еместігі мен турбуленттілік қарқындылығының әсері де ескерілді. Нәтижелер S815 симметриялы емес қалақ роторы EN0005 және NASA0018 қалақша роторларымен салыстырғанда жоғары динамикалық айналу моменті мен қуат коэффициентін (Cr) көрсеткенін көрсетті, бұл оны жел жылдамдығының төмен үкқолданбалары үшін тиімдірек етеді.

Орнынан қозғалуға тағы бір маңызды факторы - ротор қалақтарының саны, қалақшалардың санын оңтайландыру жақсы іске қосу сипаттамалары мен жоғары өнімділікке әкеледі.

#### **Материалдар мен әдістері**

Эксперименттік қондырғының схемасы 1 суретте көрсетілген. Эксперимент әдістемесі [9, 138 -б.] жұмысының ұсыныстарына сәйкес орындалды.



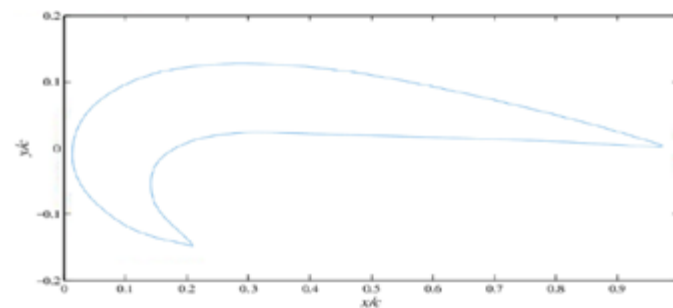
Сурет 1 – Т–1–М аэродинамикалық құбырының схемасы  
1 – жұмыс бөлігі, 2 – сақина, 3 – диффузор, 4 – желдеткіш,  
5 – өтпелі арна, 6, 7, 9, 10 – айналмалы қалақтар, 8 – кері арна,  
11-13 – туралау торлары, 12 – форкамера,  
14 – коллектор (саптама), 15 – зерттеу объектісі

Желдеткіш 0.55 кВт электр қозғалтқышымен және номиналды айналу жиілігі 2800 айн/мин ағынның жылдамдығы 4 м/с-тан 20 м/с-қа дейін өзгеріп, сандық анемометрмен бекітілді. Зерттелетін нысан жел туннелінің жұмыс бөлігіне орналастырылды, оның жұмыс бөлігінің өлшемі 0,5 метр және ұзындығы 0,8 метр. Жел туннелінің жұмыс бөлігінде үш компонентті аэродинамикалық таразы бар, олар жел туннеліндегі модельге әсер ететін құрамдас аэродинамикалық күштер мен моменттерді өлшеу үшін қолданылады. Құрылым мен әдістеме туралы толық мәлімет [10, 1 – 5 -бб.] жұмыста сипатталған.

Зерттелетін объект ретінде 3D басып шығару әдісімен пластиктен жасалған симметриялы емес пішінді профиль қолданылды.

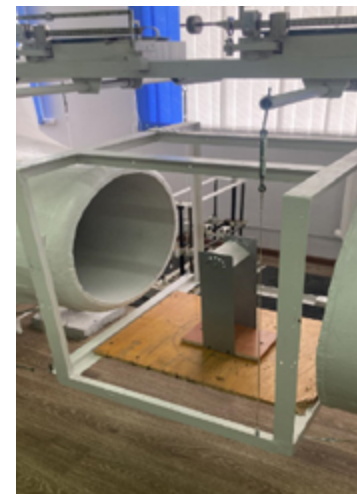
Қалақшалардың өлшемдері биіктігі 15.8 см, хорданың ұзындығы 26 см. қалақшаның пішіні NASA0021 симметриялы профилінен 2 суретте көрсетілген кішірек масштабтағы бірдей профильдің бір бөлігі алынып тасталатындай етіп таңдалды. Бұл әдіс әртүрлі профильдерді қолдануға және оларды болашақта геометриялық өлшемдердің кең шегінде зерттеу үшін пайдалануға мүмкіндік береді. NASA0021 профилін таңдау профильдің бұл түрі Дарье роторларында жиі қолданылатындығына және басқа NASA

сериялы профильдермен салыстырғанда жоғары қуат коэффициентіне ие екендігіне байланысты.



Сурет 2 – Көлденең қимадағы қалақшаның сызбасы

Симметриялы емес пішінді қалақша бүйірлік пластиналардың арасына бекітіліп, аэродинамикалық құбырдың жұмыс бөлігінде орналастырылды, 4 суретте көрсетілгендей. Бүйірлік пластиналарда атқылау бұрышын 0°-ден 180°-қа дейін 30° қадаммен реттеу үшін тесіктер қарастырылған.



Сурет 3 – Аэродинамикалық құбырдың жұмыс бөлігіндегі симметриялы емес пішінді қалақша



**Нәтижелер және талқылау**

Көтеру коэффициентін есептеу үшін формула қолданылды:

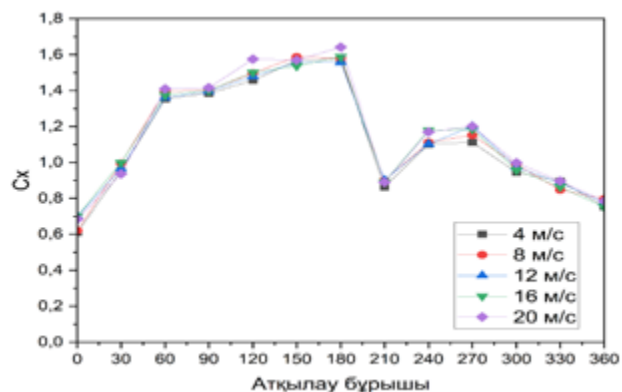
$$C_y = \frac{\Delta F_y}{\rho \cdot \frac{v^2}{2} \cdot S}; \quad (1)$$

Маңдайлық кедергі коэффициенті келесі формула бойынша есептелді:

$$C_x = \frac{\Delta F_x}{\rho \cdot \frac{v^2}{2} \cdot S}; \quad (2)$$

мұндағы  $\Delta F_x$  – маңдайлық кедергі күші, [Н];  $\rho$  – ауа тығыздығы, [кг/м<sup>3</sup>];  $v$  – ауа ағынының жылдамдығы, [м/с];  $S$  – ортаңғы қиманың ауданы, [м<sup>2</sup>].

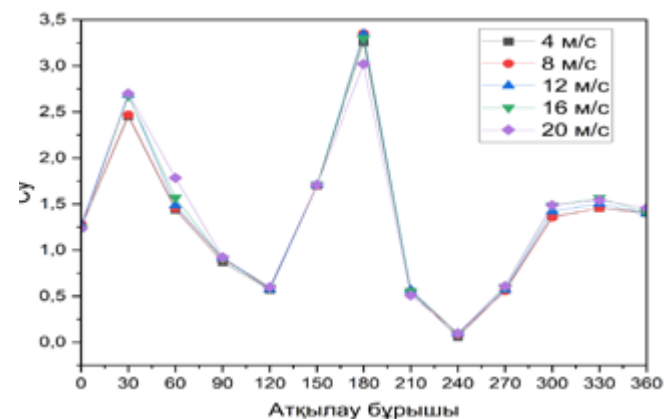
4 және 5 суреттерде симметриялы емес пішінді қалақша үшін ауа ағынының әртүрлі жылдамдықтарындағы атқылау бұрышына байланысты маңдайлық кедергі және көтеру коэффициенттерінің эксперименттік деректері келтірілген. Суреттерден көріп отырғанымыздай, маңдайлық кедергі мен көтеру коэффициенттері кіріс ағынының жылдамдығына іс жүзінде тәуелді емес.



Сурет 4 – Симметриялы емес пішінді қалақтардың кедергі коэффициентінің атқылау бұрышына әртүрлі ағын жылдамдықтарындағы тәуелділігі

4 суретті талдау атқылау бұрышындағы кедергінің коэффициенті 0° минималды екенін көрсетеді, өйткені қалақтың ең жеңілдетілген бөлігіне сәйкес келеді. Атқылау бұрышының 60° дейін өсуімен коэффициент

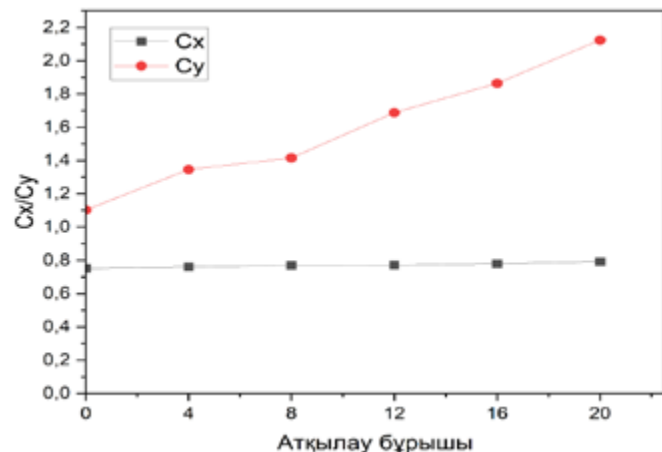
қалақшаның ортаңғы бөлігін ұлғайту арқылы артады. Атқылау бұрышы 150° болғанда, қалақша ауа ағынының бағытына қарай «Ілмекпен» ашылады, бұл кедергі коэффициентінің максималды мәніне әкеледі. Коэффициент 210° бұрышқа дейін төмендейді, бұл жағдайда қалақ өзінің құйрық бөлігімен «Ілмек» аймағын жабады және ағын тегіс болады. Кейіннен коэффициент 270° градусқа дейін көтеріледі, ал қалақша градусқа жететін ағынға бағытталған үлкен ортаңғы қимаға ие. Қалақшаны 330° градусқа дейін бұрылуымен коэффициент өзінің соңғы мәніне дейін төмендейді.



Сурет 5 – Симметриялы емес пішінді қалақтардың көтеру күшінің коэффициентінің атқылау бұрышына байланысты әртүрлі ағын жылдамдықтарындағы тәуелділігі

5 суреттің талдауынан көрініп тұрғандай, көтеру күшінің коэффициенті атқылау бұрыштары 30°, 180° және 300° болғанда үш максималды мәнге ие. Ең жоғары мән 180° атқылау бұрышында байқалады, бұл қалақтың ағынға толық бұрылуына сәйкес келеді. Осы жағдайда қалақ өзінің «Ілмек» бөлігімен ауа ағынын ұстап, аталған нәтижеге алып келеді. Көтеру күшінің коэффициентінің өзгеру қисығы қалақтың ағынға қатысты орналасуымен түсіндіріледі.

6 суретте атқылау бұрышының 0°-тан 20°-қа дейінгі диапазонда көтеру күші және маңдайлық кедергі коэффициенттеріне әсер ететін эксперименттік деректер көрсетілген.



Сурет 6 – Асимметриялық пішінді қалақтардың көтеру күшінің және лобтық кедергі коэффициенттерінің 20 м/с жел жылдамдығында әртүрлі атқылау бұрыштарына тәуелділігі

Атқылау бұрышының ұлғаюымен кедергі коэффициенті айтарлықтай өспейтіні байқалады. Бұл қалақтың төменгі бетінде қысымның таралу мәндерінің артуымен байланысты. Сонымен қатар, атқылау бұрышының ұлғаюына қарай көтеру күшінің коэффициенті де артады. Бұл құбылыс ағынның үзілу нүктесінің атқылау бұрышының ұлғаюымен алдыңғы жиегіне жақындай түсуімен түсіндіріледі.

#### Қаржыландыру туралы ақпарат

Жұмыс Қазақстан Республикасы Ғылым және жоғары білім министрлігінің Ғылым комитетінің қаржылай қолдауымен жүргізілді. (Грант №. AP22685893, «Турбинаның тиімділігін арттыру үшін жел электр станциясында қолданылатын асимметриялық пішінді қалақтардың аэродинамикалық сипаттамаларын зерттеу»).

#### Қорытынды

Бұл жұмыста алғаш рет Дарье жел турбинасының сипаттамаларын жақсартуға мүмкіндік беретін ерекше симметриялы емес пішінді қалақша профилі ұсынылды. Геометриялық және режимдік параметрлердің кең диапазонында эксперименттік зерттеулер жүргізілді.

Аэродинамикалық құбырда тәжірибелер жүргізіліп, әртүрлі атқылау бұрыштары мен ағын жылдамдықтары үшін аэродинамикалық маңдайлық кедергі коэффициенттері мен көтеру күштері талданды.

Аэродинамикалық күштер: Қалақшаға әсер ететін аэродинамикалық күштердің ең үлкен мәндері атқылау бұрыштары 180°-тан 210°-қа дейін болғанда байқалды. Кедергі күші мен көтеру күшінің максималды мәндері сәйкесінше  $C_x = 1,68$  және  $C_y = 3,45$  болды.

Қалақтардың тиімділігі: Симметриялы емес пішінді қалақша көтеру күшінің артуын және әртүрлі атқылау бұрыштарында кедергінің шамалы артуын көрсетті, бұл оларды төмен жылдамдықтағы жел жағдайларында тиімді етеді.

Бұл нәтижелер симметриялы емес қалақшалары бар роторлардың дизайнын одан әрі жетілдіру үшін қолданылуы мүмкін, бұл олардың іске қосу сипаттамаларын және қуат коэффициенттерін жақсартуға мүмкіндік береді. Осы бағыттағы одан әрі зерттеулер жел энергетикалық қондырғылардың төмен жел жылдамдығы жағдайында энергия өндіруін арттыруға ықпал етеді.

#### ПАЙДАЛАНЫЛҒАН ӘДЕБИЕТТЕР

- 1 Gupta R, Biswas A, Sharma K. K. Comparative study of three-bucket Savonius turbine with combined three-bucket-Savonius-three-bladed-Darrieus turbine. *J Renew Energy* 2008;33:1974 – 81. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2007.12.008>
- 2 Batista, N. C., Melicio, R., Matias, J. C. O., & Catalao, J. P. S. (2011). New blade profile for Darrieus wind turbines capable to self-start. *IET Conference on Renewable Power Generation (RPG 2011)*. <https://doi.org/10.1049/cp.2011.0219>
- 3 Sayed, M. A., Kandil, H. A., & Shaltot, A. (2012). Aerodynamic analysis of different wind-turbine-blade profiles using finite-volume method. *Energy Conversion and Management*, 64, 541–550. <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2012.05.030>
- 4 Reddy, K.U., Deb, B., Roy, B. Experimental Study on Influence of Aspect Ratio and Auxiliary Blade Profile on the Performance of H-Type Darrieus Wind Rotor. *Arabian Journal for Science and Engineering* 2024; 49(2), с. 1913-1929. <http://dx.doi.org/10.1016/j.oceaneng.2023.114697>.
- 5 Dubey, L.D., Kalugotla, V.R., Gupta, R., Sengupta, A.R. Investigation on Aerodynamic Performance of Unsymmetrical Blade Profile by Experimental and CFD Analysis. *Lecture Notes in Mechanical Engineering* 2024; P. 451-459. [http://dx.doi.org/10.1007/978-981-97-0900-7\\_37](http://dx.doi.org/10.1007/978-981-97-0900-7_37).
- 6 Mostafa Mazarbhuiya, H.M.S., Sengupta, A.R., Biswas, A., Sharma, K.K. Wind tunnel investigation of blade pitch effect for performance improvement of an asymmetric bladed H-Darrieus VAWT under low wind speed condition.

International Journal of Ambient Energy 2024; 45(1), 2277300. <https://doi.org/10.1080/01430750.2023.2277300>.

7 **Singh, M.A., Biswas, A., Misra, R.D.** «Investigation of self-starting and high rotor solidity on the performance of a three S1210 blade H-type Darrieus rotor». Renewable Energy 2015; 76:381-387. <http://dx.doi.org/10.1016/j.renene.2014.11.027>.

8 **A.R. Sengupta., A. Biswas., R. Gupta.** «Studies of some high solidity symmetrical and unsymmetrical blade H-Darrieus rotors with respect to starting characteristics, dynamic performances and flow physics in low wind streams». Renewable Energy 2016; 93:536-547 <http://dx.doi.org/10.1016/j.renene.2016.03.029>.

9 **Tanasheva N. K.** Aerodynamics of a rotating cylinder system of variable cross-section. –Karaganda, 2015. -138.

10 **N.C. Batista, R. Melicio, J.C.O. Matias, J.P.S. Catalao.** New blade profile for Darrieus wind turbines capable to self-start, in: IET Conference on Renewable Power Generation, 2011, pp. 1–5. <http://dx.doi.org/10.1049/cp.2011.0219>.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1 **Gupta R, Biswas A, Sharma K.K.** Сравнительное исследование трехлопастной турбины Савониуса и комбинированной трехлопастной турбины Савониуса с трехлопастной турбиной Дарье. Журнал Renewable Energy 2008;33:1974–81. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2007.12.008>

2 **Batista, N. C., Melicio, R., Matias, J. C. O., & Catalao, J. P. S.** Новый профиль лопасти для ветряных турбин Дарье, способных к самозапуску. Конференция IET по возобновляемой энергетике (RPG 2011). <https://doi.org/10.1049/cp.2011.0219>

3 **Sayed, M. A., Kandil, H. A., & Shaltot, A.** Аэродинамический анализ различных профилей лопастей ветряных турбин с использованием метода конечных объемов. Energy Conversion and Management, 64, 541–550. <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2012.05.030>

4 **Reddy, K. U., Deb, B., Roy, B.** Экспериментальное исследование влияния отношения сторон и вспомогательного профиля лопастей на производительность ротора Н-типа Дарье. Arabian Journal for Science and Engineering 2024; 49(2), с. 1913–1929. <http://dx.doi.org/10.1016/j.oceaneng.2023.114697>

5 **Dubey, L. D., Kalugotla, V. R., Gupta, R., Sengupta, A. R.** Исследование аэродинамической производительности несимметричного профиля лопасти с использованием экспериментального и CFD-анализа. Lecture Notes in

Mechanical Engineering 2024; P. 451–459. [http://dx.doi.org/10.1007/978-981-97-0900-7\\_37](http://dx.doi.org/10.1007/978-981-97-0900-7_37)

6 Mostafa Mazarbhuiya, H.M.S., Sengupta, A.R., Biswas, A., Sharma, K.K. Исследование влияния угла наклона лопасти на улучшение производительности асимметричных лопастей H-Darrieus VAWT в аэродинамической трубе при низких скоростях ветра. International Journal of Ambient Energy 2024; 45(1), 2277300. <https://doi.org/10.1080/01430750.2023.2277300>

7 **Singh, M.A., Biswas, A., Misra, R.D.** «Исследование самозапуска и высокой нагрузки ротора на трехлопастном Н-типа роторе Дарье с профилем S1210». Renewable Energy 2015; 76:381–387. <http://dx.doi.org/10.1016/j.renene.2014.11.027>

8 **A.R. Sengupta, A. Biswas, R. Gupta.** «Исследование роторов H-Darrieus с высокой загрузкой, симметричных и асимметричных лопастей, в условиях низких скоростей ветра». Renewable Energy 2016; 93:536–547. <http://dx.doi.org/10.1016/j.renene.2016.03.029>

9 **Танышова Н. К.** Аэродинамика вращающегося цилиндра с переменным сечением. – Караганда, 2015. – 138 с.

10 **N. C. Batista, R. Melicio, J.C.O. Matias, J.P.S. Catalao.** Новый профиль лопасти для ветряных турбин Дарье, способных к самозапуску. В: Конференция IET по возобновляемым источникам энергии, 2011, с. 1–5. <http://dx.doi.org/10.1049/cp.2011.0219>

18.01.25 ж. баспаға түсті.

23.01.25 ж. түзетулерімен түсті.

10.03.25 ж. басып шығаруға қабылданды.

\*Ж. Қ. Сейдулла<sup>1</sup>, М. С. Исатаев<sup>2</sup>, Р. Қ. Манатбаев<sup>3</sup>, А. Қ. Ершина<sup>4</sup>, С. Додаев<sup>5</sup>  
<sup>1,2,3,5</sup>Казахский национальный университет имени аль-Фараби,

Республика Казахстан, г. Алматы

<sup>4</sup>Казахский национальный женский педагогический университет,

Республика Казахстан, г. Алматы

Поступило в редакцию 18.01.25

Поступило с исправлениями 23.01.25

Принято в печать 11.03.25

## ИССЛЕДОВАНИЕ АЭРОДИНАМИКИ НЕСИММЕТРИЧНЫХ ЛОПАСТЕЙ ДЛЯ ВЕТРЯНОЙ ТУРБИНЫ С ВЕРТИКАЛЬНОЙ ОСЬЮ

*В данной работе рассматриваются экспериментальные результаты, полученные для лопастей несимметричной формы в аэродинамической трубе, где изучались коэффициенты подъемной силы и лобового сопротивления при различных значениях скорости потока и углов атаки.*

*Результаты показали, что лопасти несимметричной формы достигают максимальных значений коэффициентов подъемной силы и лобового сопротивления при углах извержения от 180° до 210°, при этом коэффициенты, согласно анализу, составили  $C_x = 1,68$  и  $C_y = 3,45$ . Эти данные показывают высокую эффективность лопастей при более низких скоростях ветра, что делает их перспективными для использования в ветроэнергетических установках (ВЭУ), где важны характеристики проблемы смещения и высокая выработка энергии.*

*Полученные результаты могут быть использованы для дальнейшего совершенствования дизайна роторов с несимметричными лопастями, что поможет улучшить характеристики самозапуска и увеличить коэффициент мощности.*

*Данное исследование способствует разработке рекомендаций по оптимизации конструкции и эксплуатационных параметров ветряных установок, что, в свою очередь, может повысить их надежность и экономическую эффективность. Таким образом, работа направлена на расширение знаний в области ветроэнергетики и разработку технологий, способствующих широкому внедрению ВЭУ в энергетическую инфраструктуру различных регионов.*

**Ключевые слова:** проблема самозапуска; угол атаки; аэродинамика лопастей несимметричной формы; коэффициент лобового сопротивления; подъемная сила.

\*Zh. K. Seidulla<sup>1</sup>, M. S. Isataev<sup>2</sup>, R. K. Manatbayev<sup>3</sup>, A. K. Ershina<sup>4</sup>, S. Dodayev<sup>5</sup>  
<sup>1,2,3,5</sup>Al-Farabi Kazakh National University, Republic of Kazakhstan, Almaty

<sup>4</sup>Kazakh National Women's Pedagogical University,

Republic of Kazakhstan, Almaty

Received 18.01.25

Received in revised form 23.01.25

Accepted for publication 10.03.25

## STUDY OF AERODYNAMICS OF ASYMMETRIC BLADES FOR VERTICAL AXIS WIND TURBINE

*This paper presents experimental results obtained for asymmetrical blades tested in a wind tunnel, where lift and drag coefficients were studied at various flow speeds and angles of attack.*

*The results showed that asymmetrical blades achieve maximum lift and drag coefficients at attack angles ranging from 180° to 210°, with the coefficients being  $C_x = 1,68$  and  $C_y = 3,45$ , according to the analysis. These findings demonstrate the high efficiency of the blades at lower wind speeds, making them promising for use in vertical axis wind turbines (VAWT), where good self-starting characteristics and high energy output are critical.*

*The obtained results can be utilized for further improvements in the design of rotors with asymmetrical blades, enhancing self-starting performance and increasing power coefficients.*

*This study contributes to the development of recommendations for optimizing the design and operational parameters of wind turbines, which, in turn, can improve their reliability and economic efficiency. Thus, the work is aimed at expanding knowledge in the field of wind energy and developing technologies that promote the widespread adoption of VAWTs in the energy infrastructure of various regions.*

**Keywords:** self-starting problem; angle of attack; aerodynamics of asymmetrical blades; drag coefficient; lift force.

<https://doi.org/>

**\*Г. К.Сыдыкова<sup>1</sup>, И. Б.Құлтан<sup>2</sup>, Д. Акбаров<sup>3</sup>,  
А. М. Айтуғанова<sup>4</sup>**

<sup>1</sup>ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-6841-028X>

<sup>2</sup>ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-9485-0425>

<sup>3</sup>ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-8689-0619>

<sup>4</sup>ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-8141-5157>

\*e-mail: [sydykova77@mail.ru](mailto:sydykova77@mail.ru)

<sup>1,2,4</sup>Қорқыт Ата атындағы Қызылорда университеті,  
Қазақстан Республикасы, Қызылорда қ.

<sup>3</sup>«Ташкент ирригация және ауыл шаруашылығын механикаландыру  
инженерлері институты» Ұлттық зерттеу университеті,  
Өзбекстан Республикасы, Ташкент қ.

## **ҚАЗАҚСТАН МЕН ӨЗБЕКСТАНДА ЖАҢАРТЫЛАТЫН ЭНЕРГИЯ КӨЗДЕРІН ДАМУДЫҢ ӘЛЕУЕТІ МЕН ПЕРСПЕКТИВАЛАРЫ**

*2015 жылы БҰҰ Бас Ассамблеясы бекіткен тұрақты даму мақсаттары 15 жылдық күн тәртібінің негізгі элементтері болып табылады және оларға қол жеткізу планетаның табиғи ресурстарын қорғауды және жер бетіндегі барлық тіршілік иелері үшін лайықты өмір сүру жағдайларын жасауды қамтамасыз ететін басым көрсеткіштерден тұрады. Қазіргі уақытта әлем тұрақты даму үшін, әсіресе энергетика мен қоршаған ортаға қатысты үнемі жаңа қиындықтарға тап болады. Тұрақты инфрақұрылымға, технологияға, өмір салтына және ресурстарды әділ бөлуге жылдам қошуға ықпал ететін жаһандық экономикалық өзгеріс қажет.*

*Соңғы жылдары халықаралық қоғамдастық әлемдік энергетикалық нарықта туындайтын түрлі проблемаларға байланысты энергетикалық өтпелі кезеңге жәрдемдесуге бел буды. Бұл тұрғыда жаңартылатын көздер энергия балансын әртараптандыруда маңызды рөл атқарады, бұл декарбонизацияны жеделдету үшін өміршең шешім болып табылады. Бұл мақалада энергетикалық секторлары пайдалы қазбаларға негізделген Қазақстан мен Өзбекстан мысалында ресурстарға бай елдің*

*«жасыл» экономикаға және орнықты энергетикалық болашаққа көшуін қолдаудың экологиялық таза және тиімді нұсқасының проблемалары мен перспективалары қарастырылады. Қазіргі уақытта осы мемлекеттердегі Энергетикалық жүйе екі негізгі сынаққа тап болады: электр энергиясына сұраныстың артуы және қоршаған ортаның ластануын бақылау қажеттілігі. Екі елде де энергетика секторы жергілікті өндірілген көмірге қатты тәуелділікке байланысты көмірқышқыл газы шығарындыларының өте маңызды үлесін құрайды. Энергетика секторы үшін отынды таңдау болашақ көміртегі шығарындыларының траекториясын анықтайтын негізгі факторлардың бірі болып табылады. Болашақта жаңартылатын энергетиканың кең таралуына кедергі келтіретін негізгі мәселе қазба отын секторына мемлекеттік бағдарлау жатады.*

*Кілтті сөздер: урбанизация, жаңартылатын энергия, күн және жел энергиясы, көміртегі шығарындылары, декарбонизация, генерация.*

### **Кіріспе**

Шектеулі табиғи ресурстарды тиімді пайдаланудың, парниктік газдардың шығарылуын азайтудың, өнеркәсіптік, ауыл шаруашылық және басқа да салалардың бәсекеге қабілеттілігін арттырудың маңыздылығы атап өтілуде. Бұл электр энергиясына жұмсалатын шығындарды азайту, жаңа жұмыс орындары мен экономикалық қызмет түрлерін құру арқылы жүзеге асады. Осыған байланысты энергия үнемдеу маңызды рөл атқарады, яғни экономикалық, экологиялық және әлеуметтік тұрғыдан сол деңгейдегі өндіріс пен қызмет көрсету үшін энергияны аз жұмсауды қамтамасыз ету [1].

Көптеген өнеркәсіп салаларының қарқынды дамуы, урбанизация және экономиканың өсуі бүкіл әлемде энергиямен жабдықтауға деген сұраныстың артуына себеп болып отыр [1]. Болжамдарға сәйкес, 2040 жылға қарай энергияға деген қажеттілік жылына 1,2%-ға өседі, ал негізгі мұнай экспорттаушылары бұл жоғары сұранысты қанағаттандыра алмайды [2]. Сонымен қатар, қазба отынын жағу көмірқышқыл газы мен метан сияқты парниктік газдармен, сондай-ақ азот оксидтері сияқты басқа да ауаны ластаушы заттармен атмосфераның ластануына ең көп үлес қосады [3]. Парниктік әсерге ең үлкен үлесті көмірқышқыл газының шығарындылары қосады, оның 75%-ы энергия өндіру үшін, әсіресе, көмірмен жұмыс істейтін жылу электр станцияларында қазба отынын жағудың нәтижесінде пайда болады [4]. Сынап, полициклді көмірсутектер және ұшқыш заттар сияқты ластаушылар жаһандық жылынуға әсер етіп, әрі қарай климаттың елеулі өзгерістеріне алып келеді. Мұның барлығы адам денсаулығына айтарлықтай

әсер етеді [5]. Қазба отынын өндіру қоғам мен қоршаған ортаға айтарлықтай қауіп төндіретінін ескере отырып, маңызды шаралар қабылдау қажет [6]. Сондықтан гидроэнергия, күн энергиясы, жел энергиясы, геотермалдық энергия, биогаз және биомассадан алынатын энергия сияқты әртүрлі жаңартылатын энергия көздерін пайдалану ең жақсы балама болып табылады. Дәстүрлі энергия көздерімен салыстырғанда, жаңартылатын энергия – бұл экология мен адам үшін қауіпсіз, тұрақты тәсіл болып табылады және ол энергияға деген қажеттілікті қанағаттандыра алады [7].

Қазақстан мен Өзбекстан – жаңартылатын энергия көздерін кеңінен пайдалануға ұмтылып жатқан елдер. Қазақстан солтүстігі мен батысында Ресеймен (шекарасының ұзындығы – 7548,1 км), шығысында Қытаймен (1782,8 км), ал оңтүстігінде Қырғызстанмен (1241,6 км), Өзбекстанмен (2351,4 км) және Түрікменстанмен (426 км) шектеседі. Қазақстанның шығыс шекарасынан Моңғолияның батыс шекарасына дейінгі қашықтық шамамен 40 км. Қазақстанның құрлықтағы жалпы шекарасының ұзындығы – 13 392,6 км. Елдің шығыстан батысқа дейінгі ұзындығы – 2963 км, ал солтүстіктен оңтүстікке дейін – 1652 км. Қазақстан – Түркі кеңесіне мүше елдер арасында аумағы ең үлкен мемлекет. Қазақстанда жаз ыстық, ал қыс өте суық болатын күрт континенттік климатқа ие. Қыс мезгілі орташа жылы, кейде +10 °С-қа дейін жылынулар мен –15 °С-қа дейін суытулар болып тұрады (Қызылорда облысында –30 °С-қа дейін, кей жылдары –40 °С-қа дейін жетуі мүмкін). Жаз ұзақ әрі ыстық. Кейде температура +45 °С-қа дейін, ал Оңтүстік Қазақстан облысының оңтүстігінде +49 °С-қа дейін жетеді. Жылдық орташа жауын-шашын мөлшері аумақтың басым бөлігінде 100-500 мм аралығында болады.

Өзбекстан Әмудария мен Сырдария өзендерінің арасындағы аумақта орналасқан және оның ауданы 448,9 мың шаршы км құрайды. Республиканың батыстан шығысқа дейінгі ұзындығы – 1425 км, солтүстіктен оңтүстікке дейін – 930 км. Ел аумағы солтүстігінде және солтүстік-шығысында Қазақстанмен, шығысы мен оңтүстік-шығысында Қырғызстан және Тәжікстанмен, батысында Түрікменстанмен, ал оңтүстігінде Ауғанстанмен шектеседі. Мемлекеттік шекараның жалпы ұзындығы – 7090,12 км. Ауғанстанмен шекараның ұзындығы – 143 км, Қазақстанмен – 2356,31 км, Қырғызстанмен – 1476,12 км, Тәжікстанмен – 1283,2 км және Түрікменстанмен – 1831,49 км. Өзбекстанның климаты – күрт континенттік. Күндізгі және түнгі, жазғы және қысқы температуралардың күрт айырмашылығы болады. Жыл мезгіліне байланысты температура айырмашылығы айтарлықтай үлкен. Қаңтардың орташа температурасы -6°С-қа дейін төмендейді, ал шілденің орташа температурасы +32°С-қа дейін көтеріледі. Жылдық жауын-шашын мөлшері жазық жерлерде 120–200 мм, ал таулы аймақтарда 1000 мм-ге дейін жетеді.

Жауын-шашын мөлшері аз болғандықтан, ауыл шаруашылығы негізінен суармалы егіншілікке тәуелді.

### Материалдар мен әдістері

Қазақстанның Біртұтас электр энергетикалық жүйесі штаттық режимде жұмыс істейді және Ресей Федерациясы мен Орталық Азия елдерінің энергетикалық жүйелерімен параллельді режимде әрекет етеді. Қазіргі уақытта елде 220 электр станциясы жұмыс істейді, оның ішінде жалпы қуаты 2,8 ГВт болатын 144 жаңартылатын энергия көздері (ЖЭК) нысаны бар. 2022 жылы Қазақстанда жалпы қуаты 385 МВт болатын жаңартылатын энергия көздерінде 12 энергетикалық нысан пайдалануға берілді. Сонымен қатар, 2021 жылы қосымша қуаты 495,6 МВт болатын 16 ЖЭК нысаны іске қосылды.

2024 жылдың 1 қаңтарындағы жағдай бойынша жалпы қолжетімді қуат көлемі 20,4 ГВт құрады, ал жұмыс қуаты – 15,4 ГВт болды. Биылғы күзгі-қысқы кезеңдегі тұтынудың ең жоғары деңгейі – 16,6 ГВт, ал генерацияның ең жоғары деңгейі – 15,1 ГВт. 2023 жылы электр энергиясын тұтыну көлемі 115 млрд кВтсағ деңгейінде болды, ал электр энергиясын өндіру көлемі 112,8 млрд кВтсағ құрады. Бұл ретте көршілес елдерден электр энергиясын импорттау көлемі 3,4 млрд кВтсағ, ал экспорт 1,4 млрд кВтсағ құрады.

Қазақстанда «жасыл экономикаға» көшу тұжырымдамасы бойынша стратегиялық құжаттар қабылданған («Стратегия 2050», 2013, «Жасыл экономика тұжырымдамасы», 2013), бұл «Рио+20» дүниежүзілік саммитінен (2012) кейін жүзеге асты. Ел осы тұжырымдаманы қолдау мақсатында нормативтік-құқықтық реформалар саласында белгілі бір жетістіктерге жетті. Олардың қатарына Қазақстанның экологиялық кодексін әзірлеу (тұрақты түрде жаңартылатын процесс), энергия тиімділігі мен жаңартылатын энергия көздері саласындағы саясатты әзірлеу кіреді. Мұндай әрекеттердің бір мысалы – 2020 жылы газ құбырының құрылысы. Ұзындығы 1 081 км құбыр Қараөзек, Жезқазған, Қарағанды және Астана қалаларын оңтүстік-батыс Қазақстаннан елдің орталық бөлігімен байланыстырады. Бұл 2011-2013 жылдары жылыту үшін 40%-ды құраған көмірді пайдалануды шамамен 2,7 млн үй шаруашылығында қысқартуға бағытталған [8].

Қазіргі кезеңде Өзбекстандағы барлық жұмыс істеп тұрған гидроэлектростанциялардың қуаты 1700 МВт-ты құрайды, ал электр энергиясының жылдық орташа өндірісі шамамен 6 млрд кВт/сағ деңгейінде, бұл елдегі барлық электр станциялары өндіретін электр энергиясының 12%-ын құрайды. Өзбекстанда гидроэнергетиканы одан әрі дамыту шағын өзендердің, суару арналарының, су қоймалары мен су ағындарының әлеуетін іске асыру арқылы жүзеге асырылады. Бұл нысандарда орнатылған қуаты 1700 МВт-тан асатын, жылына 8 млрд кВт/сағ дейін электр энергиясын

өндіруге қабілетті шамамен 150 шағын және микро гидроэлектростанция салуға болады.

Көріп отырғанымыздай, республикада осы шағын және микро ГЭС-тердің техникалық әлеуетін іске асырған жағдайда, барлық гидроэлектростанциялардың электр энергиясын жылдық жиынтық өндіру көлемі 14-15 млрд кВт/сағ-қа дейін артуы мүмкін [9].

#### Нәтижелер және талқылау

Өзбекстан Республикасында 2023 жылғы 16 ақпандағы Президенттің №ПП-57 Жарлығымен бірқатар ынталандыру шаралары қарастырылған. Алайда, жабдықтың құны мен оны пайдалану шығындары әлі де жоғары болып отыр. Мысал келтірейік: нарықта қуаты 10 кВт болатын жабдықтың бағасы шамамен 5500 долларды құрайды. Шынында да, Жарлыққа сәйкес, шығындардың бір бөлігі сатудан түскен қаражат және 1 мың сум мөлшеріндегі субсидия бөлу арқылы өтеледі. Бірақ барлық ынталандыру шараларын ескергеннің өзінде, бір үй шаруашылығының орташа өтелу мерзімі шамамен 15-20 жылды құрайды [10].

2009 жылдан 2019 жылға дейін жаңартылатын энергия көздеріне деген жаһандық қызығушылық  $15,1 \times 10^{18}$  Дж-ға артты, бұл жыл сайынғы 4,4%-дық өсіммен сипатталады. Халықаралық энергетика агенттігінің (ХЭА) мәліметі бойынша, 2040 жылға қарай жаңартылатын энергия көздерінен электр энергиясын өндіру көлемі 40%-ға өсуі керек.

Қазақстан Республикасында ЖЭК дамытуға мемлекеттік қолдау жүйесі 2009 жылдан бастап заңнамамен бекітілген. Қолдау жүйесі халықаралық озық тәжірибені ескере отырып әзірленген. 2013 жылы ЖЭК секторын дамытуға нақты мақсаттар қойылып, соның нәтижесінде ЖЭК нарығының көлемі мен парниктік газдарды азайту әлеуеті анықталды. Қазақстанның «жасыл» экономикаға көшу тұжырымдамасы мен «Қазақстан – 2050» Стратегиясында бұл мақсаттарға сәйкес елдің энергетикалық балансындағы баламалы және жаңартылатын энергия көздерінің үлесін 2020 жылға қарай 3%-ға, 2030 жылға қарай 15%-ға және 2050 жылға қарай 50%-ға жеткізу қарастырылған.

2023 жылдың қорытындысы бойынша Қазақстанда орнатылған қуаты 2890 МВт болатын 162 ЖЭК нысаны жұмыс істейді (1-суретте көрсетілген).

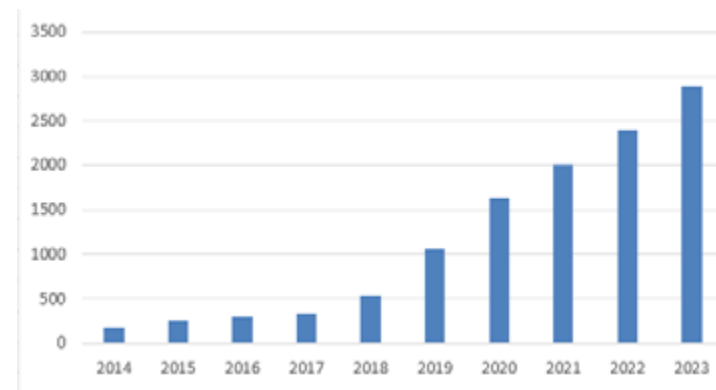
2000 жылдардан бастап Өзбекстан ЖЭК дамытуға күш салып келеді, бұл ретте күн және жел энергетикасына басымдық берілуде. ЖЭК қуаты 2000 жылы 50 МВт-тан аз болса, 2023 жылға қарай шамамен 1,5 ГВт-қа жетіп, елдің жалпы электр қуатының шамамен 7,5%-ын құрады. 2005 жыл: ЖЭК жалпы қуаты 100 МВт-қа жетті, бұл күн электр станциялары мен шағын гидроэлектростанциялардың құрылысымен байланысты.

2010 жыл: ЖЭК қуаты 250 МВт-қа жетеді. Жел электр станциялары елдің энергетикалық балансына елеулі үлес қоса бастайды.

2015 жыл: Орнатылған ЖЭК қуаты 500 МВт-тан асады. Қазіргі заманғы технологияларды қолданатын ірі жобалар жүзеге асырылады.

2020 жыл: ЖЭК қуаты 1 ГВт-қа жетеді. Күн электр станцияларының үлесі ұлғаяды, ірі күн станциялары салынады.

2023 жыл: ЖЭК жалпы қуаты 1,5 ГВт-тан асады деп күтілуде, бұл Өзбекстанның энергетикасының тұрақты дамуына елеулі үлес қосады.

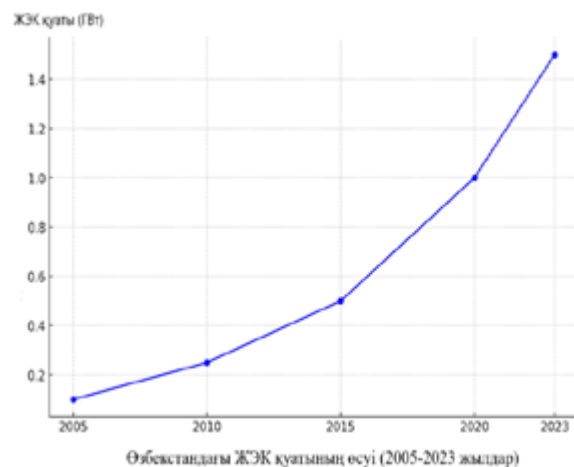


Сурет1 – Қазақстанда орнатылған жаңартылатын энергия көздерінің жыл сайынғы көрсеткіштері

2-суретте 2005 жылдан 2023 жылға дейін Өзбекстандағы жаңартылатын энергия көздерінің қуатының өсуі көрнекі түрде көрсетілген. 2005 жылы 100 МВт-тан басталып, 2023 жылы күтілетін 1,5 ГВт-қа дейін өскен ЖЭК қуатының тұрақты өсуі байқалады, бұл елдің энергетикалық инфрақұрылымының тұрақты дамуына елеулі үлес қосқанын көрсетеді.

3-суретте елдің жалпы энергетикасындағы әртүрлі энергия көздерінің үлесі дөңгелек диаграммада ұсынылған, бұл деректер ойдан шығарылған. Диаграммадан көріп отырғанымыздай, елдің жалпы энергетикасына ең үлкен үлесті табиғи газ (45 %) және көмір (30 %) қосса, ал жаңартылатын энергия көздері, мысалы, күн және жел энергиясы әлдеқайда аз үлесті құрайды — сәйкесінше 7 % және 3 %.

Бұл көптеген елдердегі кең тараған жағдайды көрсетеді, онда дәстүрлі қазба отындар энергетикада басты рөл атқарып отыр, алайда ЖЭК үлесі артатын үрдіс байқалады.



Сурет 2 – Өзбекстандағы қуаттың өсуі



Сурет 3 – Өзбекстанның жалпы энергетикасындағы әртүрлі энергия көздерінің үлесі

2023 жылға қарай Өзбекстан ЖЭК-ті интеграциялау саласында айтарлықтай жетістіктерге жетті, нәтижесінде жаңартылатын энергия көздерінің жалпы энергетикалық балансындағы үлесі 7,5%-ға жетті. Ең маңызды жобалардың арасында:

- «Навои» күн электр станциясы: Өзбекстандағы алғашқы және ең ірі күн электр станцияларының бірі, қуаты 100 МВт, 2021 жылы іске қосылды.

- «Бұхара» жел электр станциясы: Қуаты 500 МВт, бұл Орталық Азиядағы ең үлкен жел электр станциясы, 2022 жылы жұмысын бастады.

- «Ташкент» гидроэлектростанциясы: Бұл станцияның қуатын 300 МВт-қа дейін ұлғайту 2020 жылы гидроэнергетиканың елдің энергетикалық балансындағы үлесін едәуір арттырды.

Қазақстанда жаңартылатын энергия көздерінің айтарлықтай әлеуеті бар, олардың дамуы экологиялық, экономикалық және әлеуметтік тұрғыдан елеулі пайда әкелуі мүмкін. Елдің төмен көміртекті энергетикаға қатысты ұлттық стратегиясы 2050 жылға қарай электроэнергия өндірісінде жаңартылатын энергия көздерінің үлесін 50%-ға жеткізуге бағытталған.

Электроэнергетика саласын дамыту бойынша іс-шаралар жоспары сәтті жүзеге асырылған жағдайда, 2035 жылға қарай отын түрлері бойынша орнатылған қуат құрылымы келесідей болады:

ЖЭК – 24,4 %

Су электр станциялары – 10,8 %

Газ – 25,8 %

Көмір – 34,3 %

АЭС – 4,7 %

Көмірмен жұмыс істейтін генерацияның электр энергиясын тұтытудағы үлесінің айтарлықтай төмендеуі жаңартылатын, баламалы энергия көздері мен газ генерациясының енгізілуі арқасында қамтамасыз етіледі. Осылайша, 2035 жылға қарай жылына 44 миллион тонна CO<sub>2</sub> деңгейінде көміртекті өтемақыға қол жеткізу жоспарлануда.

Өзбекстан да басқа елдер сияқты климаттың өзгеруі мен қазба ресурстардың таусылу мәселелеріне тап болып отыр. Осыған байланысты Өзбекстан үкіметі жаңартылатын энергия көздерін пайдалануға көшу бойынша шаралар қабылдауда. Алайда, қазіргі уақытта Өзбекстандағы жаңартылатын энергия көздерінің жалпы электр энергиясын өндіру көлеміндегі үлесі әлі де аз, шамамен 5%-ды құрайды.

«Жаңа Өзбекстанды дамыту стратегиясы 2022-2026» бойынша жаңартылатын энергетиканы дамытуға ерекше көңіл бөлінуде. 2026 жылға дейін жаңартылатын энергия көздерінен (ЖЭК) өндірілетін электр энергиясының көлемін 11 000 МВт деңгейіне жеткізу міндеті қойылған және орындалып жатыр.

Арнайы 2026 жылға қарай Өзбекстанда күн және жел электр станцияларының қуаты 8 000 МВт-қа, су электр станцияларының қуаты 2 920 МВт-қа жетеді (жалпы 10 920 МВт).

Нәтижесінде, 2026 жылы елде өндірілетін жалпы электр энергиясының 25%-ы жаңартылатын энергия көздерінен («жасыл» энергиядан) келеді.



Бұл сонымен қатар жыл сайын шамамен 3 миллиард текше метр табиғи газды үнемдеуге мүмкіндік береді. Мұндай көлемдегі үнемделген газ 1 миллион үйді 1 жыл бойы табиғи газбен қамтамасыз етуге тең.

Немесе осы көлемдегі үнемделген табиғи газды пайдалану арқылы қосымша 15 миллиард кВтсағ электр энергиясын өндіруге болады. Айта кетейік, бұл көлемдегі электр энергиясы – 15 миллиард кВтсағ – бүгінде Өзбекстанның барлық физикалық тұтынушыларын (халқын) жыл бойы қамтамасыз ету үшін жеткілікті.

Болжамдарға сәйкес, жаңартылатын энергия көздерінің энергетикалық баланстағы үлесі артып, Өзбекстанға тұрақты және экологиялық таза энергетикалық болашаққа жол ашады. Халықаралық ынтымақтастықты және технологиялық жаңалықтарды күшейту осы процесті жеделдету үшін жаңа мүмкіндіктер ашады.

#### Қаржыландыру туралы ақпарат

Бұл мақала жоспарлы – мақсатты қаржыландыру жобасы негізінде әзірленді (BR21882415).

#### Қорытынды

Қазақстандағы бар жаңартылатын энергия көздерінің техникалық әлеуеті мол және оны көміртегі шығарындыларын азайту мен халыққа қолжетімді тарифтер бойынша болашақтағы электр энергиясына деген сұранысты қамтамасыз ету үшін тиімді пайдалану мүмкіндігі бар. 2050 жылға дейін үкіметтің жаңартылатын энергия көздерінің үлесін арттыру жөніндегі жоспарлы мақсаттарына қол жеткізу үшін үкімет тарапынан ұлттық, аймақтық, жергілікті және салалық деңгейлерде бірқатар шаралар қабылдануы қажет.

Соңғы жиырма жылда Өзбекстан жаңартылатын энергия көздерін дамытуда айтарлықтай қадамдар жасады, тұрақты даму мен көміртегі шығарындыларын азайту мақсаттарына адал екенін көрсетті. «Навои» күн электр станциясы, «Бұхара» жел электр станциясы және «Ташкент» гидроэлектр станциясы сияқты ірі жобалар елдің осы саладағы жетістіктерінің жарқын мысалдары болып табылады. Инфрақұрылым мен технологияларды жақсарту бойынша жалғасып жатқан жұмыстар Өзбекстандағы ВИЭ секторын әрі қарай дамытуға мүмкіндік береді.

Бұл екі ел пайдалы қазбаларды пайдалану үлесін азайту бойынша үлкен жұмыс атқарып жатыр. Географиялық жағдайына байланысты, бұл екі елде жаңартылатын энергия көздерінен энергия алу пайдалы болып табылады. Осы өңірлерде күн сәулесі мен тау аймақтарында тұрақты жел жылдамдығы жоғары деңгейде байқалады.

## ПАЙДАЛАНЫЛҒАН ДЕРЕКТЕР ТІЗІМІ

1 **Poti'c, I., Joksimovi'c, T., Milin'ci'c, U., Ki'covi'c, D., Milin'ci'c M.** Wind energy potential for the electricity production-Knjaževac Municipality case study (Serbia). *Energy Strategy Rev* 2021;33:100589. <https://doi.org/10.1016/j.esr.2020.100589>

2 **Bhatia, S.K., Jagtap, S.S., Bedekar, A.A., Bhatia, R.K., Patel, A.K., Pant, D., Rajesh Banu, J., Rao, C.V., Kim, Y.G., & Yang, Y.H.** Recent developments in pretreatment technologies on lignocellulosic biomass: Effect of key parameters, technological improvements, and challenges. *Bioresour Technol*, 300, Article 122724. (2020). <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2019.122724>

3 Commission for Environmental Cooperation. North American Power Plant Air Emissions; Commission for Environmental Cooperation: Montreal, QC, Canada, 2011.

4 **Steen, M.** Greenhouse Gas Emissions from Fossil Fuel Fired Power Generation Systems; Institute for Advanced Materials: Seville, Spain, 2001.

5 **Vohra, K., Vodonos, A., Schwartz, J., Marais, E.A., Sulprizio M.P., Mickley, L.J.** Global mortality from outdoor fine particle pollution generated by fossil fuel combustion: Results from GEOS-Chem Environmental Research, Volume 195, April 2021, Page 110754. DOI:[10.1016/j.envres.2021.110754](https://doi.org/10.1016/j.envres.2021.110754)

6 **Bhatia, S.K., Palai, A.K., Kumar, A., Bhatia, R.K., Patel, A.K., Thakur, V.K., Yung-Hun Yang** Trends in renewable energy production employing biomass-based biochar. *Bioresour Technol* 2021;340:125644. DOI:[10.1016/j.biortech.2021.125644](https://doi.org/10.1016/j.biortech.2021.125644)

7 **Banu, J.R., Ginni, G., Kavitha, S., Kannah, R.Y., Kumar, S.A., Bhatia, S.K., Kumar, G.** Integrated biorefinery routes of biohydrogen: Possible utilization of acidogenic fermentative effluent. *Bioresour Technol* 2021;319:124241. DOI:[10.1016/j.biortech.2020.124241](https://doi.org/10.1016/j.biortech.2020.124241)

8 **Abdildin, Y.G., Nurkenov, S.A., Kerimray, A.** Analysis of Green Technology Development in Kazakhstan. *International Journal of Energy Economics and Policy*, 2021, 11(3), 269-279. DOI:[10.32479/ijee.10897](https://doi.org/10.32479/ijee.10897)

9 **Abduvaliyev, M.Q.** Renewable Energy in Uzbekistan. 2615-8159 |p-ISSN: 2615-1898. DOI: <https://doi.org/10.31149/ijhcs.v3i7.2179>

10 Decree of the President of the Republic of Uzbekistan dated February 16, 2023. s.57 «On measures to accelerate introduction of renewable energy sources and energysaving technologies in 2023»

21.01.25 ж. баспаға түсті.

22.01.25 ж. түзетулерімен түсті.

10.03.25 ж. басып шығаруға қабылданды.

\*Г. К. Сыдыкова<sup>1</sup>, И. Б. Култан<sup>2</sup>, Д. Акбаров<sup>3</sup>, А. М. Айтуганова<sup>4</sup>

<sup>1,2,4</sup>Қызылординский университет имени Коркыт Ата,

Республика Казахстан, город Кызылорда

<sup>3</sup>Национальный исследовательский университет «Ташкентский институт инженеров ирригации и механизации сельского хозяйства»,

Республика Узбекистан, г. Ташкент

Поступило в редакцию 21.01.25

Поступило с исправлениями 22.01.25

Принято в печать 11.03.25

### **ПОТЕНЦИАЛ И ПЕРСПЕКТИВЫ РАЗВИТИЯ ВОЗОБНОВЛЯЕМЫХ ИСТОЧНИКОВ ЭНЕРГИИ В КАЗАХСТАНЕ И УЗБЕКИСТАНЕ**

*Цели устойчивого развития, утвержденные Генеральной Ассамблеей ООН в 2015 году, являются ключевыми элементами повестки дня на 15 лет, и их достижение состоит из приоритетных показателей, обеспечивающих охрану природных ресурсов планеты и создание достойных условий жизни для всех живых существ на земле. В настоящее время мир постоянно сталкивается с новыми вызовами для устойчивого развития, особенно в отношении энергетики и окружающей среды. Появляется необходимость глобального экономического изменения, которая способствует быстрому переходу к устойчивой инфраструктуре, технологиям, образу жизни и справедливому распределению ресурсов.*

*В последние годы международное сообщество решительно настроено на содействие энергетическому переходному периоду в связи с различными проблемами, возникающими на мировом энергетическом рынке. В этом контексте возобновляемые источники играют все более значительную роль в диверсификации энергетического баланса, представляя собой жизнеспособное решение для ускорения декарбонизации. В данной статье рассматриваются проблемы и перспективы экологически чистого и эффективного варианта поддержки перехода богатой ресурсами страны к «зеленой» экономике и устойчивому энергетическому будущему на примере Казахстана и Узбекистана, энергетические секторы которых основаны на полезных ископаемых. В настоящее время энергетическая система в данных государствах сталкивается с двумя основными вызовами: растущим спросом на электроэнергию и необходимостью контролировать загрязнение окружающей среды. В обеих странах*

*энергетический сектор составляет очень значительную долю выбросов углекислого газа из-за сильной зависимости от угля местного производства. Выбор топлива для энергетического сектора является одним из основных факторов, определяющих траекторию будущих выбросов углерода. Основные препятствия, препятствующие широкому распространению возобновляемой энергетики в будущем, включают государственную ориентацию на сектор ископаемого топлива.*

*Ключевые слова: урбанизация, возобновляемые источники энергии, солнечная и ветровая энергия, выбросы углерода, декарбонизация, генерация.*

\*G. Sydykova<sup>1</sup>, I. Kultan<sup>2</sup>, D. Akbarov<sup>3</sup>, A. Aituganova<sup>4</sup>,

<sup>1,2,4</sup>Korkyt Ata Kyzylorda University,

Republic of Kazakhstan, Kyzylorda

<sup>3</sup>National Research University «Tashkent Institute of Irrigation and Agricultural Mechanization Engineers», The Republic of Uzbekistan, Tashkent

Received 21.01.25

Received in revised form 22.01.25

Accepted for publication 10.03.25

### **POTENTIAL AND PROSPECTS FOR THE DEVELOPMENT OF RENEWABLE ENERGY SOURCES IN KAZAKHSTAN AND UZBEKISTAN**

*The Sustainable Development Goals, approved by the UN General Assembly in 2015, are key elements of the 15-year agenda, and their achievement consists of priority indicators that ensure the protection of the planet's natural resources and the creation of decent living conditions for all living beings on earth. Currently, the world is constantly facing new challenges for sustainable development, especially with regard to energy and the environment. There is a need for global economic change, which contributes to a rapid transition to sustainable infrastructure, technology, lifestyle and equitable distribution of resources.*

*In recent years, the international community has been determined to facilitate the energy transition period in connection with various problems arising in the global energy market. In this context, renewable sources are playing an increasingly significant role in diversifying the energy mix, representing a viable solution to accelerate decarbonization. This article*

*examines the problems and prospects of an environmentally friendly and effective option to support the transition of a resource-rich country to a “green” economy and a sustainable energy future using the example of Kazakhstan and Uzbekistan, whose energy sectors are based on minerals. Currently, the energy system in these States is facing two main challenges: the growing demand for electricity and the need to control environmental pollution. In both countries, the energy sector accounts for a very significant share of carbon dioxide emissions due to its heavy dependence on locally produced coal. The choice of fuel for the energy sector is one of the main factors determining the trajectory of future carbon emissions. The main obstacles preventing the widespread adoption of renewable energy in the future include government focus on the fossil fuel sector.*

*Keywords: urbanization, renewable energy sources, solar and wind energy, carbon emissions, decarbonization, generation.*

FTAMP 44.37.03

<https://doi.org/>

**\*С. К. Шерьязов<sup>1</sup>, С. Т. Тайманов<sup>2</sup>, А. М. Мұхамбетжан<sup>3</sup>,  
А. А. Ауесхан<sup>4</sup>**

<sup>1</sup>Оңтүстік Орал мемлекеттік аграрлық университеті  
Ресей Федерациясы, Челябинск қ.;

<sup>2</sup>Қорқыт ата атындағы Қызылорда университеті,  
Қазақстан Республикасы, Қызылорда қ.;

<sup>3</sup>Қызылорда ашық университеті,  
Қазақстан Республикасы, Қызылорда қ.;

<sup>4</sup>Л. Н. Гумилев атындағы Еуразия ұлттық университеті  
Қазақстан Республикасы, Астана қ.

<sup>1</sup>ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-8795-5114>

<sup>2</sup>ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-5375-1180>

<sup>3</sup>ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-0799-6229>

<sup>4</sup>ORCID: <https://orcid.org/0009-0001-1591-6789>

\*e-mail: [sakenu@yandex.ru](mailto:sakenu@yandex.ru)

## **КҮН БАТАРЕЯЛАРЫНЫҢ ЭНЕРГЕТИКАЛЫҚ КӨРСЕТКІШТЕРІН МОДЕЛЬДЕУ**

*Электр энергиясын дамыту оның тиімділігін арттыру арқылы энерго үнемдеу шараларын енгізу арқылы мүмкін болады. Энергияны үнемдеудің бір жолы — таралған генерацияны дамыту, дәстүрлі түрде қолданылатын органикалық отын түрлері мен жаңартылатын энергия көздерін негізге ала отырып. Жаңартылатын энергия органикалық отын тұтынуды азайтуға және сәйкесінше қоршаған ортаға шығын келтіруді төмендетуге ғана емес, сонымен қатар тұтынатын энергия шығындарын азайтуға бағытталған, бұл энергия үнемдеудің ерекшелігін береді. Жаңартылатын энергия көздерінің арасында күн энергиясы таралған генерацияны дамытуда басым бағыттардың бірі болып табылады. Оның қолжетімділігі мен бар болуы тұрғысынан артықшылығы кез келген электрмен жабдықтау жүйесі үшін электр энергиясын өндіруге мүмкіндік береді. Фотоэлектрлік эффект күн энергетикасының дамуының негізі болып табылады. Осы ретте фотоэлектрлік жүйелер, әсіресе күн батареялары, ең перспективті болып табылады. Үлкен электр*

энергетикасында үлкен қуатты фотоэлектрлік қондырғылар орнатылып, үлкен мөлшерде күн батареялары жинақталады. Бұл ретте күн энергиясын пайдалану бойынша инвестициялар органикалық отыннан энергия өндіру бойынша инвестициялардан асып түседі. Фотоэлектрлік жүйелердің энергетикалық көрсеткіштерін анықтауда маңызды кезең – күн батареяларының жұмыс режимін модельдеу. Мақалада күн батареясының жұмыс режимін зерттеуге және оның энергетикалық сипаттамаларын өзгермелі эксплуатациялық факторлар жағдайында бағалауға мүмкіндік беретін математикалық модель ұсынылған.

*Кілтті сөздер:* жаңартылатын энергетика, фотоэлектрлік жүйе, күн элементі, күн батареясы, энергетикалық сипаттамалары, максимал қуат, қызу температурасы.

### Кіріспе

Жаңартылатын энергия көздерін (ЖЭК) қолдану энергетика дамуының басым бағыттарының бірі болып табылады. Әлемде жаңартылатын энергияны басқа пайдалы энергияға түрлендіруші сан алуан энергетикалық қондырғылар жұмыс жасайды [1, 1-б; 2, 1-б].

Әлемдегі жыл сайын енгізілетін жаңартылатын энергия негізіндегі қуат көлемі, қазба отын түрлері негізіндегі қуат көлемінен көп. Жаңартылатын энергетикадағы инвестициялар, қазба отын түрлерінен энергия өндірудегі инвестициялардан шамамен екі есе үлкен. Әлемде электр энергетикасындағы инвестициялардың 75 % жуығы жаңартылатын электр энергетикасына тиесілі және дамушы елдердің де бұл салаға елеулі инвестициялар салып жатқаны байқалады. Инвестициялар деңгейі бойынша Қытай алда келеді [3].

Электр энергетикасы бойынша жаңадан енгізілген қуаттар арасында күн электр энергетикасы озық болып табылады. Жаңадан орнатылған қуат шамамен 33 % өсті. 2024 жылдың соңына қарай бүкіл әлемде енгізілген және пайдаланудағы күн электр энергетикасы қондырғыларының қуаты шамамен 700 ГВт асады.

### Материалдар мен әдістері

Күн электр стансаларын (КЭС) салу таратылған генерация дамуының перспективалы бағыты болып табылады. Бұл ретте фотоэлектрлік жүйелерде (ФЭЖ) ең кең таралғаны кремний элементтерінен тұратын күн батареялары (КБ) [4, 2-б].

Күн электр энергетикасы нарығының дамуы жағдайында ФЭЖ жобалау, жасау және жұмыс режимдерін талдауға байланысты зерттеулер жүргізу қажеттілігі туындайды. Бұл ретте негізгі компонент ретінде, КБ жұмыс

режимдерін зерттеу және модельдеу, ФЭЖ энергетикалық көрсеткіштерін анықтау мен таңдауда маңызды кезең болып табылады.

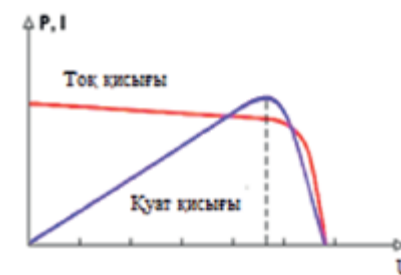
ФЭЖ жобалау кезінде КБ сыртқы сипаттамаларын (СС), вольт-амперлік және вольт-ваттық сипаттамаларын бейнелейтін, орынбасу сұлбасына негізделген адекватты моделін алу қажет. Бұл үшін КБ негізгі параметрлерін анықтау керек. КБ параметрлерінің шынайылығы оның типіне, қолданылған технологияға және күн элементтерін (КЭ) дайындау сапасына тәуелді.

КБ құжатында келтірілген техникалық деректері оның СС, әсіресе вольт-ваттық сипаттамасын тұрғызу үшін жеткіліксіз. Сонымен бірге КБ параметрлерінің мәндері, күн радиациясы мен температураның эталондық мәндері ретінде қабылданған бір ғана шамасына сәйкес келеді. Шын мәнінде, КБ пайдалану кезінде күн радиациясының шамасы мен оның температурасы кең аралықта өзгереді [5, 3-б].

Сонымен, КБ орынбасу сұлбасының параметрлерін және оның максимал қуатын анықтау үшін математикалық моделін жасау керек. Ол КБ жұмыс режимдерін және энергетикалық көрсеткіштерін өзгермелі пайдалану жағдайында бейнелеуі қажет. Бұл ретте КБ параметрлерін шынайы анықтау және оның жұмыс режимдерін модельдеу дәлдігі өзекті міндет болып табылады.

КБ математикалық модельдерін жасау және оның параметрлерін анықтау мәселесіне бірқатар ғылыми зерттеулер арналған [6]. Оларда қарапайым КЭ р және n типті екі жартылай өткізгіш пластиналарынан тұратын «бутерброд» түрінде бейнеленеді және олар күн сәулесі әсерінен электр тоғын өндіреді.

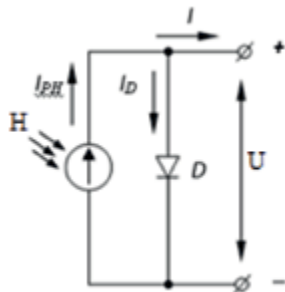
КЭ конструкциясы мен жұмыс принципі әртүрлі зерттеулерде толығымен сипатталған [7]. Ток және кернеу бойынша қажетті параметрлер алу үшін күн батареяларының өзінде кремний пластинкалары аралас сұлба бойынша жалғанады. Нәтижесінде КБ сыртқы сипаттамасы, ток пен қуаттың кернеуге тәуелділігі, 1 суретте бейнеленген түрде болады [5, 3-б].



Сурет 1– КБ сыртқы сипаттамалары

Сыртқы сипаттамада максимал қуат нүктесін (МҚТ) ерекшелеуге болады. Максимал қуат нүктесіндегі кернеу мен ток күшінің мәндері КБ параметрлеріне, жарық көзі спектрінің құрамына, сәуленің түсу бұрышына, КБ температурасына және т.б. тәуелді. Барлық аталған параметрлер, әсіресе температура уақыт бойынша үнемі өзгереді, бұл тиісінше график формасының және ондағы максимал қуат нүктесі орнының өзгеруіне алып келеді.

КЭ параметрлерін және жұмыс режимдерін зерттеу үшін эквивалентті электрлік орынбасу сұлбасы негізінде тұрғызылған математикалық модельдер қолдану кеңінен таралған. Идеал КЭ орынбасу сұлбасы 2 суретте бейнеленген.



Сурет 2– Идеал күн элементінің эквивалентті орынбасу сұлбасы

Бұл модель бойынша КЭ шығысындағы токты келесі өрнек бойынша анықтауға болады

$$I = I_{PH} - I_D = I_{PH} - I_0 \cdot \left[ \exp\left(\frac{q \cdot U}{k \cdot T}\right) - 1 \right], \quad (1)$$

мұнда – фототок; – идеал диод тоғы; – КЭ абсолюттік температурасы; – КЭ шығысындағы кернеу; – электрон заряды; – Больцман тұрақтысы; – диодтың кері қанығу тоғы.

Теңдеу құрамында белгісіз екі параметр және бар, олар өз кезегінде күн инсоляциясының шамасы мен КЭ температурасына тәуелді. Жалпы жұрт қабылдаған ұйғарымдарды қолданып, оларды келесі өрнектер бойынша анықтауға болады [7]:

$$I_{PH} = [I_{SC\_STC} + k_I \cdot (T - T_{STC})] \cdot H \quad (2)$$

мұнда және – күн элементінің стандартты жағдай кезіндегі қысқа тұйықталу тоғы және температурасы;  $k_I$  – қысқа тұйықталу тоғының температуралық коэффициенті.

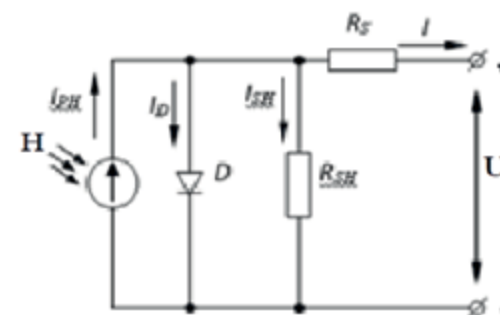
Диодтың кері қанығу тоғы:

$$I_0 = \left[ \frac{I_{SC\_STC}}{\exp\left(\frac{q \cdot U_{OC\_STC}}{A \cdot k \cdot T_{STC}}\right) - 1} \right] \cdot \left(\frac{T}{T_{STC}}\right)^3 \cdot \exp\left[\frac{q \cdot E_G}{k \cdot A} \left(\frac{1}{T_{STC}} - \frac{1}{T}\right)\right], \quad (3)$$

мұнда  $E_G$  – жартылай өткізгіштің тыйым салынған энергетикалық аймағының ені.

Келтірілген модель көмегімен КЭ сыртқы сипаттамасын жеткілікті оңай есептеуге болады. Бірақ, оның салыстырмалы қарапайымдылығына байланысты, модельдеу дәлдігі жоғары болмайды.

Реал күн элементерінде сөзсіз энергия шығындары болады, және модельдеу дәлдігін арттыру үшін 3 суретте бейнеленген орынбасу сұлбасын қолданады.



Сурет 3 – Реал КЭ эквивалентті орынбасу сұлбасы

Бұл модель үшін КЭ тоғы мен кернеуі арасындағы байланысты келесі теңдеумен жазуға болады:

$$I = I_{PH} - I_D - I_{SH} = I_{PH} - I_0 \cdot \left[ \exp\left(\frac{q(U + IR_S)}{A \cdot k \cdot T}\right) - 1 \right] - \frac{U + I \cdot R_S}{R_{SH}}, \quad (4)$$

мұнда  $A$  – диод идеалдығының коэффициенті;  $R_S$  және  $R_{SH}$  – тиісінше КЭ тізбектелген және параллель кедергілері.

Күн элементінің белгілі екі диодты немесе үш диодты басқа да орынбасу сұлбалары бар [7], олар көп белгісіз параметрлерді анықтауды қажет етеді. Орынбасу сұлбаларын талдау, КБ жұмыс режимдерін модельдеу дәлдігін арттыру үшін, модельді күрделендіру қажеттігін көрсетеді. Бұл жағдайда, күрделілік пен модельдеу дәлдігі арасында компромистік шешім қабылдау талап етіледі.

Жұмыста реал КЭ бір диодты және екі кедергілі орынбасу сұлбасы (3-сурет) қарастырылады, ол модельдің қарапайымдығы мен дәлдігі арасындағы компромистік шешім болып табылады. Міне осыған байланысты бұл модель ұқсас зерттеулер жүргізуде кеңінен тараған [8].

КБ шығысында берілген қуатты алу үшін практикада тізбектей-параллель жалғанған көп ұқсас КЭ тізбектері қолданылады. Бұл ретте тізбектей жалғанған  $N_s$  және параллель жалғанған  $N_p$  күн элементтерінен алынатын ток шамасы келесі өрнек бойынша анықталады

$$I = N_p \cdot I_{PH} - N_p \cdot I_0 \cdot \left[ \exp\left(\frac{q(U + IR_s)}{N_s \cdot A \cdot k \cdot T}\right) - 1 \right] - \frac{U + I \cdot R_{SH}}{R_{SH}}, \quad (3)$$

мұнда  $I$   $U$ , – КБ қысқыштарындағы ток пен кернеу; және – КБ эквивалентті кедергілері.

КБ жұмыс режимін модельдеу кезінде түсетін күн энергиясының деңгейін білу қажет. Күн сәулесі қуатымен сипатталады, оны өлшеуге болады, ал сағаттық интервалдар үшін оның ұзақтығын белгілі ықтималдықпен бағалауға болады.

Модельдеу кезінде температураның КБ энергетикалық сипаттамаларына әсерін де ескеру қажет. Сонымен бірге КБ температурасының өсуі кезінде оның өндіретін қуатының төмендеуін күту керек [9].

Сонымен, күні бойы КБ түсетін күн энергиясы мен температурасы, және де олармен байланысты энергетикалық сипаттамалары өзгермелі болады. Бұл, атап айтқанда, КБ қуатының өзгеруін оның максимал қуат нүктесінде бағалау үшін және КБ ПӘК мен жұмыс режимін дәл модельдеу үшін ескеру қажеттілігіне алып келеді.

КБ моделін жасау негізінде максимал қарапайымдылық пен пайдаланушы үшін ыңғайлылық принципі жатуы керек. Бұл ретте төлқұжаттық деректерін қолданып, КБ жұмыс режимінің шынайы моделін алу қажет. Модельдеу нәтижелерін, әртүрлі типті КБ сынау барысында алынған, тәжірибелік деректермен тексеру маңызды.

### Нәтижелер және талқылау

КБ жұмыс режимін модельдеу барысында оның сыртқы сипаттамасын, бос жүріс, қысқа тұйықталу және максимал қуат нүктелеріндегі ток пен кернеуінің мәндерін алу маңызды. Бұл мәндер ФЭЖ кейбір компоненттерінің (зарядттау контроллері, ЕИМ-контроллері және т.б.) параметрлерін таңдау үшін қажет.

Берілген пайдалану жағдайында КБ сыртқы сипаттамасын алу үшін орынбасу сұлбасының параметрлерін білу керек. Оларды математикалық модель негізінде жеткілікті дәлдікпен анықтауға болады.

КБ жұмыс режимін модельдеу үшін есептеудің құрамдастырылған алгоритмі ұсынылады, және ол «Solver» қондырмасы орнатылған MS Excel электрондық кестесінде жүзеге асырылды. Компьютерлік модель негізіне жатқызылған, жасалған әдістемеді қоршаған климаттық орта жағдайының өзгеруі кезінде және мәндерін анықтау үшін келесі теңдеулер қолданылды:

$$I_{PH} = \left[ \frac{R_{SH} + R_s}{R_{SH}} I_{SC\_STC} + k_I \cdot (T - T_{STC}) \right] \cdot \frac{H}{H_{STC}} \quad (8)$$

$$I_0 = \frac{I_{SC\_STC} + k_I \cdot (T - T_{STC})}{\exp\left(\frac{U_{OC\_STC} + k_V \cdot (T - T_{STC})}{A \cdot U_T}\right) - 1} \quad (9)$$

Ұсынылған модельді тексеру үшін TSM-30A күн батареясының техникалық сипаттамасының деректері қолданылды [10]. Математикалық модельдеу нәтижесі бойынша алынған орынбасу сұлбасының параметрлері 1 кестеде келтірілген.

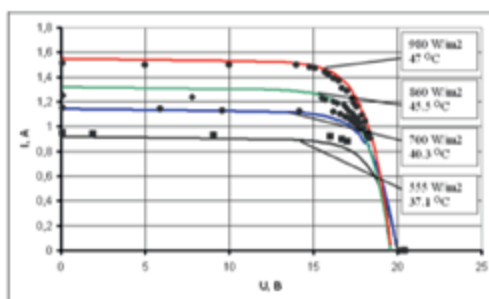
Кесте 1 – TSM-30A КБ орынбасу сұлбасының есептік параметрлері

Параметр	Мәні
$I_0$ , А	$9.98 \cdot 10^{-8}$
$I_{PH}$ , А	8.214
A	1.3
$R_s$ , Ом	0.2226
$R_{SH}$ , Ом	451.66

Реал пайдалану жағдайында модельдің КБ сыртқы сипаттамасын бейнелеу қабілеттілігін тексеру үшін күн сәулесі мен температураның

өзгеруі кезіндегі сипаттамаларына есептеулер жүргізілді. TSM-30A КБ мысалында жүргізілген зерттеулер нәтижелері 4 суретте келтірілген. Суретте маркерлермен тәжірибелік деректер белгіленген, ал графиктер есептік сипаттамаларға сәйкес келеді.

Деректерді талдау, TSM-30A типті КБ жұмыс режимін модельдеу нәтижелері эксперименттік деректермен жақсы сәйкес келетінін көрсетеді. КБ сыртқы сипаттамаларын модельдеудің салыстырмалы қателігі 5% аспайды.



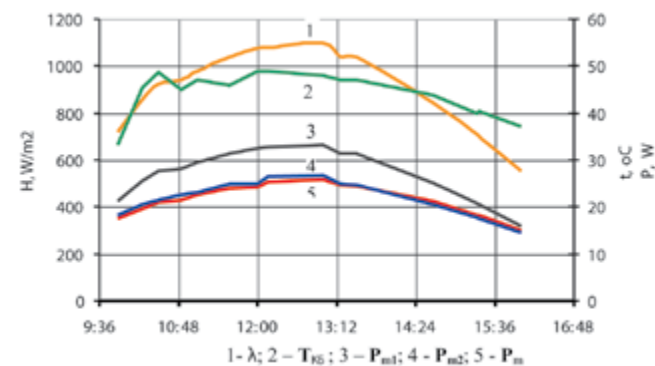
Сурет 4 – TSM-30A сыртқы сипаттамасын модельдеу нәтижелері мен тәжірибелік деректер

TSM-30A деректерімен әртүрлі жарықтандыру мен температура кезінде КБ сыртқы сипаттамаларын модельдеудің абсолюттік қателіктері 0,11 А аспайды. Бұл ретте, максимал қателік бос жүріс және ішінара қысқа тұйықталуға жуық режимдерде байқалады. Бұл айырмашылық соншалықты маңызды (критикалық) емес, өйткені заманауи ФЭЖ, басқару нәтижесінде КБ максимал қуаты облысында жұмыс істейді.

Сонымен, КБ жұмыс режимін модельдеу кезінде энергетикалық сипаттамаларының жоғары дәлдігін максимал қуат нүктесі маңында қамтамасыз ету маңызды. КБ моделінің дәлдігін тексеру үшін жұмыста келтірілген деректер де қолданылды. Салыстырмалы талдау, қарастырылып отырған модель сыртқы сипаттаманы модельдеудің басқа белгілі – модельдерінің дәлдігін қамтамасыз ететінін, және дәлдігі бойынша – модельдерінен асып түсетінін, әрі екі диод негізіндегі күрделі модельдерден болмашы кемшін түсетінін көрсетеді.

Модельдің маңызды артықшылығы температураның өзгеруі кезінде КБ энергетикалық сипаттамаларын жоғары дәлдікпен модельдеуі болып табылады. Бұл, диодтың кері тоғын анықтау үшін жұмыста ұсынылған дәлірек аналитикалық өрнекті модельде қолданумен қамтамасыз етіледі.

КБ параметрлеріне, ең алдымен максимал қуатының шамасына, оның температурасының әсер ету дәрежесін зерттеу барысында, модельдің көмегімен тамыз айы бойы төлқұжаттық максимал қуаты 30 Вт поликристалды күн батареясы параметрлерінің өзгеру графиктері алынды. КБ өндіру қуаты мен ПӘК зерттеу нәтижелері 5-ші және 6-шы суреттерде бейнеленген. Сонымен бірге салыстыру үшін күн сәулесінің қуаты мен КБ қызу температурасының өзгеруі келтірілген.

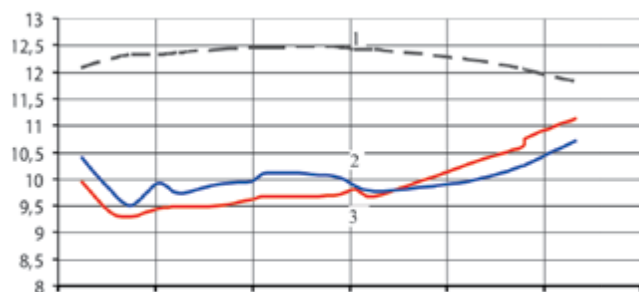


Сурет 5 – Күн бойы КБ максимал қуатының, оның температурасының және күн радиациясының өзгеруі

Келтірілген деректерден, тәжірибелік жолмен және модель көмегімен алынған КБ максимал қуатының өзгеру сипаты күн сәулесі қуатының тәуліктік жүрісін қайталайтыны көрінеді. Түсте күн сәулесінің, шағылысқан сәулені қоса алғандағы, максимал қуаты мен КБ максимал температурасы күтіледі. Сонымен бірге максимал қуат өндіру байқалады және үлкен қуат шығыны күтіледі, бұл КБ ПӘК төмендетеді.

КБ қызуын ескергендегі есептік максимал қуаттың () тәжірибелік деректермен () сәйкестігі қанағаттанарлық. Ал КБ қызуын ескермегендегі есептік максимал қуат () тәжірибелік деректермен салыстырғанда көтеріңкі, әсіресе түс кезіндегі күн сәулесі қуатының үлкен мәндерінде.

КБ қызуын ескермей модельдеу нәтижесі бойынша есептелген ПӘК де көтеріңкі болып табылады, және оның шамасы күн сәулесінің қуатына тәуелсіз дерлік (6 сурет-1). Шындығында ПӘК елеулі өзгереді (6 сурет-2), және де қызуын ескермей есептелген ПӘК едеуір төмен.



Сурет 6 – КБ ПЭК өзгеруі

КБ қызуын ескеріп жұмыс режимін модельдеу реал мәндеріне жуық нәтижелер береді (6 сурет-3). Тек таңғы және кешкі сағаттарда, күн сәулесі мен КБ температурасы шамаларының салыстырмалы аз кезінде, болмашы қателіктер пайда болады. Жалпы алғанда КБ температурасын ескеру есептеу қателігін 5% аспайтын шамаға дейін төмендетеді, ал қызуын ескермеу 30% астам қателіктерге алып келеді, әсіресе күн сәулесінің қуаты үлкен кезінде.

Сонымен, алынған деректер бойынша есептеулердегі қателіктерді төмендету үшін КБ қызуының оның жұмысына әсерін ескеру қажет. Келтірілген деректерді талдау, күн сәулесі деңгейінің артуымен КБ температурасының, қабылданған қатысты, өсетінін көрсетеді.

Ұсынылған модель КБ температурасын ескере отырып оның жұмыс режимін қанағаттанарлық сипаттайды. Тәжірибелік және теориялық деректер арасындағы айырма 5% аспайды.

#### Қорытынды

Мақалада КЭ модельдеу әдістерін жетілдіруге арналған зерттеулердің нәтижелері ұсынылған. Белгілі математикалық модельдерді салыстырмалы талдау негізінде, КЭ жұмыс режимдерін модельдеудің жеткілікті дәлдігін қамтамасыз ететін, қарапайым модель таңдалды. Ұсынылған модельді қолдану зерттеу объектісінің математикалық сипаттауын максималдық шамдауға мүмкіндік береді.

КЭ орынбасу сұлбасын және математикалық моделін зерттеу барысында оның энергетикалық сипаттамаларына әсер етуші факторлар анықталды. Модельдеу нәтижелері мен тәжірибелік деректер осы факторлардың өзара байланысын дәлелдеді.

КЭ энергетикалық сипаттамаларына әсер етуші маңызды фактор, оның қызу температурасы болып табылады. Бұл ретте КЭ температурасының

өсуімен оның ПЭК және өндіру қуаты төмендейді. КЭ қызуына күн сәулесінің әсері анықталды.

Жасалған модель КЭ орынбасу сұлбасының параметрлерін анықтауға және қарастырылып отырған факторларға байланысты КЭ максимал қуатын анықтауға мүмкіндік береді. Зерттеу нәтижелері теориялық және тәжірибелік деректердің жақсы түйісетіндігін көрсетті, ұсынылған модельдің қателігі 5% аспайды.

#### ПАЙДАЛАНЫЛҒАН ӘДЕБИЕТТЕР ТІЗІМІ

1 Шерьязов, С.К., Пташкина-Гирин, О.С. Оценка возобновляемых энергетических ресурсов для систем теплоснабжения. Международная конференция по промышленной инженерии, приложениям и производству, ICIEAM 2017. DOI: 10.1109/ICIEAM.2017.8076239.

2 Шерьязов, С.К., Шелубаев, М.В., Обухов, С.Г. Возобновляемые источники в системе распределенной генерации. Международная конференция по промышленной инженерии, приложениям и производству, ICIEAM 2017. DOI: 10.1109/ICIEAM.2017.8076247.

3 Отчет о глобальном состоянии возобновляемой энергетики, www.ren21.net/GSR; www.ren21.net/GFR.

4 Обухов, С. Г., Плотников, И. А., Шерьязов, С. К. Методы эффективного использования солнечных энергетических систем. Международная конференция по промышленной инженерии, приложениям и производству, ICIEAM 2016. DOI: 10.1109/ICIEAM.2016.7911015.

5 Шерьязов, С. К., Чигак, А. С., Тайманов, С. Т. Исследование энергетических характеристик солнечных батарей. Международная конференция по промышленной инженерии, приложениям и производству, ICIEAM 2020. Издатель: IEEE – 2020. DOI: 10.1109/ICIEAM.2019.8743093.

6 Жахрани, А.К. и др. Улучшенная математическая модель для вычисления выходной мощности солнечных фотоэлектрических модулей [International Journal of Photoenergy] том 2014, стр. 1-9.

7 Ханна, В., Дас Бишт, Б.К., Ванданак, Д., Сингх, Р.К. Модель с тремя диодами для промышленных солнечных элементов и оценка параметров солнечных элементов с использованием алгоритма PSO [Renewable Energy] том 78, 1 июня 2015 года, стр. 105–113.

8 Киулла, Г., Ло Брано, В., Ди Дио, В., Киприани, Г. Сравнение различных моделей с одним диодом для представления характеристики I–V солнечной ячейки [Renewable and Sustainable Energy Reviews] том 32 (2014), стр. 684–696.



9 **Шерязов, С.К., Чигак, А.С.** Особенности в режиме работы солнечных батарей в системе автономного электроснабжения». Материалы ЛИ Международной научно-технической конференции «Достижения науки – агропромышленному производству. Челябинск: ЧГАА, 2012. – Ч. V. стр. 142-147.

10 Solar modules [Электронный ресурс]. – Режим доступа: [http://www.telstv.ru/?page=ru\\_solar\\_modules/](http://www.telstv.ru/?page=ru_solar_modules/)

## REFERENCES

1 **Sheriazov, S. K., Ptashkina-Girina, O. S.** Vozobnovlyаемы`х e`nergeticheskix resursov dlya sistem teplosnabzheniya. Mezhdunarodnaya konferenciya po promy`shlennoj inzhenerii, prilozheniyam i proizvodstvu [Estimation of Renewable Energy Resources for Heat Supply Systems. International Conferentse on Industrial Engineering, Applications and Manufacturing] ITsIEAM 2017. DOI: 10.1109/Its-IEAM.2017.8076239.

2 **Sheriazov, S. K., Shelubaev, M.V., Obukhov, S. G.** Vozobnov-lyаемы`e istochniki v sisteme raspredelennoj generacii. Mezhdunarodnaya konferenciya po promy`shlennoj inzhenerii, prilozheniyam i proizvodstvu [Renewable Sourtes in System Distributed Generation. International Conferentse on Industrial Engineering, Applications and Manufacturing] ITsIEAM 2017. DOI: 10.1109/ItsIEAM.2017.8076247.

3 Otchet o globalnom sostoianii vozobnovliaemoi energetiki [Report on the Global State of Renewable Energy] [www.ren21.net/GSR](http://www.ren21.net/GSR); [www.ren21.net/GFR](http://www.ren21.net/GFR)

4 **Obukhov, S.G., Plotnikov, I.A., Sheriazov, S.K.** Metody` e`ffektivnogo ispol`zovaniya solnechny`x e`nergeticheskix sistem. Mezhdunarodnaya konferenciya po promy`shlennoj inzhenerii, prilozheniyam i proizvodstvu [Methods of effective use of solar power system. International Conferentse on Industrial Engineering, Applications and Manufacturing] ITsIEAM 2016. DOI: 10.1109/ItsIEAM.2016. 7911015.

5 **Sheriazov, S. K., Chigak, A, Taimanov, S.T.** Issledovanie e`nergeticheskix xarakteristik solnechny`x batarej. Mezhdunarodnaya konferenciya po promy`shlennoj inzhenerii, prilozheniyam i proizvodstvu [2020 Research of energy characteristics of solar batteries. International Conferentse on Industrial Engineering, Applications and Manufacturing] (ITsIEAM). Publisher: IEEE – 2020. DOI: 10.1109/ItsIEAM. 2019.8743093

6 **Iakhrani, A. Q. and et al.** Uluchshennaya matematicheskaya model` dlya vy`chisleniya vy`hodnoj moshhnosti solnechny`x fotoe`lektricheskix modulei [An Improved Mathematical Model for Computing Power Output of Solar Photovoltaic Modules // International Journal of Photoenergy] Volume 2014, pp.1-9.

7 **Khanna, V. Das, B.K., Bisht, D., Vandanac, Singh, P.K.** Model`s tremya diodami dlya promy`shlenny`x solnechny`x e`lementov i ocenka parametrov solnechny`x e`lementov s ispol`zovaniem algoritma PSO [A three diode model for industrial solar tsells and estimation of solar tsell parameters using PSO algorithm // Renewable Energy] Volume 78, Iune 01, 2015, pp. 105-113.

8 **Tsiulla, G., Lo Bruno, V., Di Dio, V., Tsipriani, G. A** Sravnenie razlichny`x modelej s odnim diodom dlya predstavleniya xarakteristiki I–V solnechnoj yachejki [Comparison of different one-diode models for the representation of I–V characteristic of a PV tsell] Renewable and Sustainable Energy Reviews 32 (2014) pp. 684–696.

9 **Sheriazov, S.K., Chigak, A.S.** Osobennosti v rezhime raboty solnechnykh batarei v sisteme avtonomnogo elektrosnabzheniya». Materialy LI Mezhdunarodnoi nauchno-tekhnicheskoi konferentsii «Dostizheniya nauki - agropromyshlennomu proizvodstvu [Features of Solar Battery Operation in an Off-Grid Power Supply System.» Materials of the International Scientific and Technical Conference «Scientific Achievements in Agricultural Production] Cheliabinsk : ChGAA, 2012. – Ch. V. pp. 142-147.

10 Solar modules. [Electronic resource] [http://www.telstv.ru/page=ru\\_solar\\_modules](http://www.telstv.ru/page=ru_solar_modules)

13.02.25 ж. баспаға түсті.

14.02.25 ж. түзетулерімен түсті.

10.03.25 ж. басып шығаруға қабылданды.

\*С. К. Шерьязов<sup>1</sup>, С. Т. Тайманов<sup>2</sup>, А. М. Мухамбетжан<sup>3</sup>, А. А. Ауесхан<sup>4</sup>

<sup>1</sup>Южно-Уральский государственный Аграрный университет,

Российская Федерация, г. Челябинск;

<sup>2</sup>Кызылординский университет имени Коркыт ата,

Республика Казахстан, г. Кызылорда.;

<sup>3</sup>Кызылординский открытый университет,

Республика Казахстан, г. Кызылорда;

<sup>1,4</sup>Евразийский национальный университет имени Л. Н. Гумилева,

Республика Казахстан, г. Астана.

Поступило в редакцию 13.02.25

Поступило с исправлениями 14.02.25

Принято в печать 10.03.25

## МОДЕЛИРОВАНИЕ ЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ ПОКАЗАТЕЛЕЙ СОЛНЕЧНЫХ БАТАРЕЙ

*Развитие электроэнергетики возможно путем повышения ее эффективности за счет внедрения энергосберегающих мероприятий. Одним из путей энергосбережения является развитие распределенной генерации, на основе традиционно используемых органических видов топлива и возобновляемых источников. Возобновляемая энергия призвана не только уменьшать потребление органического топлива и соответственно выбросы в окружающую среду, но и для снижения затрат на потребляемую энергию, что придает особенность в энергосбережении. В числе возобновляемых источников солнечная энергетика является одним из приоритетных направлений развития распределенной генерации. Ее преимущество по признаку доступности и наличию позволяет генерировать электроэнергию для любой системы электроснабжения. Фотоэлектрический эффект становится основой развития солнечной электроэнергетики. При этом фотоэлектрические системы на основе солнечных батарей являются наиболее перспективными. В большой электроэнергетике устанавливаются фотоэлектрические установки большой мощности с набором огромного количества солнечных батарей. При этом инвестиции в использование солнечной энергии превышают инвестиции в производство энергии из органических видов топлива. Важным этапом при определении энергетических показателей фотоэлектрических систем является моделирование рабочего режима солнечных батарей. В статье предложена математическая*

*модель, которая позволяет исследовать рабочий режим солнечной батареи и оценивать её энергетические характеристики в условиях изменяющихся эксплуатационных факторов.*

*Ключевые слова: возобновляемая энергетика, фотоэлектрическая система, солнечный элемент, солнечная батарея, энергетические характеристики, максимальная мощность, температура нагрева.*

\*S. K. Sheryazov<sup>1</sup>, A. S. Taimanov<sup>2</sup>, A.M. Mukhambetzhan<sup>3</sup>, A. A. Auyeskhan<sup>4</sup>

<sup>1</sup>South Ural State University, The Russian Federation, Chelyabinsk;

<sup>2</sup>Korkyt ata Kyzylorda University, Republik of Kazakhstan, Kyzylorda;

<sup>3</sup>Open university of Kyzylorda, Republik of Kazakhstan, Kyzylorda;

<sup>1,4</sup>L. N. Gumilyov Eurasian National University,

Republik of Kazakhstan, Astana.

Received 13.02.25

Received in revised form 14.02.25

Accepted for publication 10.03.25

## MODELING OF ENERGY PERFORMANCE OF SOLAR PANELS

*The development of the electric power industry is possible through improving its efficiency by implementing energy-saving measures. One of the ways to save energy is the development of distributed generation based on traditionally used organic fuels and renewable sources. Renewable energy is intended not only to reduce the consumption of organic fuels and, consequently, emissions into the environment but also to lower the costs of consumed energy, which gives a special focus on energy saving. Among renewable sources, solar energy is one of the priority directions for the development of distributed generation. Its advantages in terms of availability and presence allow for electricity generation for any power supply system. The photovoltaic effect becomes the foundation for the development of solar power. In this regard, photovoltaic systems based on solar panels are the most promising. In large-scale power generation, large-capacity photovoltaic installations with a vast number of solar panels are being installed. At the same time, investments in the use of solar energy exceed investments in energy production from organic fuels. An important step in determining the energy performance of photovoltaic systems is modeling the operating mode of solar panels. The article proposes a mathematical model that allows for the investigation of the operating mode*

*of a solar panel and the evaluation of its energy characteristics under changing operational factors.*

*Keywords: renewable energy, photovoltaic system, solar cell, solar panel, energy characteristics, maximum power, heating temperature.*  
*Keywords: renewable energy, photovoltaic system, solar cell, solar panel, energy performance, maximum power, temperature rise.*

МРНТИ 44.39.39

<https://doi.org/>

**К. С. Шоланов<sup>1</sup>, Н. Б. Жакипов<sup>2</sup>, \*Г. Ж. Асаинов<sup>3</sup>,**

<sup>1,2,3</sup>Казахский агротехнический исследовательский университет имени С. Сейфуллина, Республика Казахстан, г. Астана.

<sup>1</sup>ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-2077-7883>

<sup>2</sup>ORCID: <https://orcid.org/0009-0005-7239-2095>

<sup>3</sup>ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-1330-5909>

e-mail: [asainovgibrat@gmail.com](mailto:asainovgibrat@gmail.com)

## **ЭНЕРГИЯ ВЕТРОВОЙ НАГРУЗКИ ВОСПРИНИМАЕМАЯ АКТУАТОРАМИ ПАРУСНОЙ ВЕТРОВОЙ ЭЛЕКТРОСТАНЦИИ**

*Статья посвящена энергетическому анализу актуаторов манипуляторного преобразователя парусной ветровой электростанции (ПВЭС). В ПВЭС механическая энергия от ветровой нагрузки на парус преобразуется в «организованные» движения в шести актуаторах параллельного манипулятора. Затем механическая энергия этих движений в каждом актуаторе преобразуется в электрическую энергию, вырабатываемую генераторами встроенными в актуаторы. В статье ставится задача с помощью программных средств определить энергию воспринимаемую актуаторами для того, чтобы на их основе оценить энергетическую эффективность ПВЭС. Для решения поставленной задачи используются полученные ранее результаты анализа ветровой нагрузки и определения предсказанной ветровой ситуации с помощью методов искусственного интеллекта. На основе этих данных по модифицированному алгоритму с применением ПП «Mathcad» вычисляется и исследуется входная мощность от ветровой нагрузки, действующая на каждый актуатор манипулятора. Данные, полученные в результате вычислений, предлагается использовать для выбора и обоснования параметров актуаторов. Известно, что актуаторы манипуляторного преобразователя в функциональном отношении являются важной компонентой ПВЭС. Совершенствование конструкции актуаторов позволит повысить энергетическую эффективность ПВЭС в целом. Проведенные ранее исследования показали, что ПВЭС*

*могут вырабатывать электрическую энергию мощности 5-10 кВт при скоростях ветра от 2.5 м/с и выше независимо от изменения направления ветра. По этим и другим особенностям ПВЭС превосходят турбинные ветровые электростанции и могут применяться без больших издержек в качестве автономных источников энергии*

*Ключевые слова: актуаторы, генератор, манипуляторный преобразователь, возобновляемые источники энергии, парусная ветровая электростанция*

### **Введение**

В последнее время исследования ученых показали, что широкое применение органического топлива ведет к негативным экологическим последствиям, а именно, к глобальному потеплению климата из-за парникового эффекта. В следствии этого было установлено, что одним из важнейших путей для устранения негативных климатических изменений является использование возобновляемых источников энергии (ВИЭ). Из различных видов ВИЭ преимущественное применение в современном мире находит ветроэнергетика [1, с. 5]. Так как энергия ветра, которая может быть преобразована в другие виды энергии приблизительно составляет  $1,26 \times 10^9$  МВт [2, с. 6-7], что намного превышает потребность энергии в мире. Кроме того, ветроэнергетика имеет ряд преимуществ, главное из которых экологичность [3, с. 2-3]. Однако следует отметить, что в ветроэнергетике сейчас наибольшее применение нашли турбинные ветровые электростанции, которые имеют ряд недостатков заключающиеся в том, что для них проблемой является неожиданные изменения скорости и направления ветра, а также то, что нижняя граница скорости ветра выше 10 м/с, что делает невозможным их применения на обширных территориях со средней скоростью равной 2.5-3 м/с [4;5]. В этой связи представляется перспективным применение в ветроэнергетике автоматически управляемых малых парусных ветровых электростанций (ПВЭС), предложенных в работах [6;7]. Эти ПВЭС используют новую технологию преобразования энергии ветра в электрическую энергию благодаря применению манипуляторного преобразователя (МП) из параллельного манипулятора Sholkor [8 с. 9] с шестью актуаторами. Кроме того ПВЭС имеет качающийся в пространстве парус с аэродинамическим профилем воспринимающий аэродинамически силы сопротивления и подъема одновременно. Благодаря этому ПВЭС может функционировать с заданной мощностью (5-10) кВт при скоростях ветра от 2,5 м/с, независимо от изменения направления ветра. В данной статье ставится задача совершенствовать конструкцию ПВЭС. Так как главным узлом ПВЭС

в функциональном отношении является актуатор, то задача сводится к выбору параметров актуатора. По этой причине в статье предлагается для выбора приемлемых параметров актуатора использовать энергетические характеристики, а именно кпд, т.е. отношение выходной электрической мощности к входной мощности ветровой нагрузки воспринимаемой актуатором. Настоящая статья посвящена вычислению входной мощности на актуаторах в зависимости от изменения скорости ветра по величине и направлению. В дальнейшем предполагается экспериментальным путем определить кпд.

### **Материалы и методы**

Ветровую нагрузку в ПВЭС воспринимает непосредственно рабочий орган (РО), состоящий из качающегося паруса с аэродинамическим профилем, мачты и верхней платформы МП. Затем движение верхней платформ шести подвижного манипулятора относительно неподвижного основания вызывает увеличение или уменьшение длин шести актуаторов. С помощью системы отбора мощности встроенного в каждый актуатор, перемещение штока актуатора преобразуется во вращательное движение вала электрической машины генерирующего электрический ток. Первичным источником энергии в любом ветроустановке является ветер. ПВЭС обладает преимуществами в преобразования энергии ветра в электрическую энергию по следующим причинам:

– парус с аэродинамическим профилем сечения формирует подъемные силы и силы сопротивления одновременно, независимо от направления ветра (особенности паруса);

– результирующая сил, действующих на парус, из-за длины мачты, увеличиваются во много раз при действии на актуаторы (особенность мачты).

В данной статье исходным для расчета актуаторов манипулятора являются такие характеристики ветра, как скорость и направление. Экспериментальные исследования проведенные в работе [9] показывают, что эти величины изменяются стохастически причем, направление ветра может в течении секунды изменяться на противоположное, а величина скорости – на значительную величину. По этой причине массив данных экспериментального исследования скорости и направления обработаны для выявления закономерности в изменении ветровой ситуации. При этом применяется программа, подготовленная на языке программирования Python, использующая библиотеки для работы с данными и создания самообучающейся нейронной сети [10]. Полученная программа используется для предсказания направления и скорости движения по 4-м диапазонам изменения скорости ветра в м/с [0-5], [до10], [до15], [свыше15]. На Рис.1,а

представлена диаграмма изменения предсказанной скорости, а на Рис.1,б – диаграмма изменения предсказанного угла вектора скорости от севера из базы данных в диапазоне [0-5] м/с в течении 65 с., полученные путем обучения нейросетей.



а) б)  
Рисунок 1 – Предсказанные характеристики ветра

Полученные предсказанные характеристики ветровой ситуации для выбранного диапазона изменения скорости ветра в дальнейшем служат исходными данными при анализе динамики параллельного манипулятора и определения входной мощности на актуаторах.

#### Результаты и обсуждение

Согласно технологии преобразования энергии ветра в электрическую энергию реализуемой ПВЭС, энергия ветра воспринимается парусом 1, мачтой 2 и верхней платформой 9 манипулятора (Рис.2). Затем эта механическая энергия с помощью шести подвижного манипулятора преобразуется в возвратно поступательные движения каретки в шести актуаторах 3-8, связывающих основание 10 с верхней платформой 9. С помощью системы отбора мощности возвратно-поступательное движение каретки в каждом актуаторе преобразуется во вращательное движение вала электрической машины, генерирующей электрический ток. Отсюда следует, что актуатор является важной в функциональном отношении важной подсистемой ПВЭС. Конструктивные особенности и параметры актуатора определяются в результате динамического анализа манипуляторного преобразователя (МП). Ранее, в работах [6,7] была разработана динамическая модель МП и получен алгоритм силового анализа. Реализация этого алгоритма позволила с помощью ПП «Mathcad» определить усилия на каждом актуаторе при заданной скорости и направлении ветра действующего на парус. Особенность решения задач на данном этапе заключается, в том, что исходными данными для расчета являются конструктивные параметры

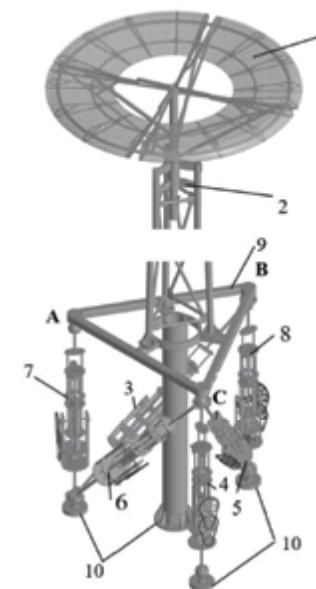


Рисунок 2 – 3D модель конструкции ПВЭС

создаваемого опытного образца ПВЭС и ветровая ситуация и заданная в виде базы данных предсказанные значения скорости и направления ветра (п.2).

В качестве исходных данных для расчета использовались следующие характеристики опытного образца ПВЭС:

- выходная мощность ПВЭС -5 кВт;
- длина стороны и высота МП – 2 м, 2 м;
- высота мачты – 12 м;
- вес мачты, паруса, верхней платформы соответственно в (Н) -2200, 950, 2600;
- парус с аэродинамическим профилем сечения А35 имеющий аэродинамический коэффициент сил сопротивления и подъемной силы - 0.14, 0.28 соответственно;
- угол отклонения мачты от вертикального положения принимается равным 20 при изменения скорости ветра в 1-м диапазоне и увеличивается на 20 с увеличением номера диапазона.

В результате расчетов по ПП «Mathcad» вычислены скорости узловых точек А,В,С верхней платформы, а также усилия, действующие на каждый актуатор от ветровой нагрузки на РО. Эти расчеты позволили в динамике

определить прогнозируемую входную мощность  $N$  на каждом актуаторе 3-8 (Рис.3) по зависимости

$$N = R \cdot \Delta l / T , ,$$

где  $R$ ,  $\Delta l$ ,  $T$  –соответственно сила, действующая на актуатор в данном узле, перемещение узла и время перемещения узловой точки.



Рисунок 3 – Прогнозируемая мощность на актуаторах

На Рисунке 3 представлена диаграмма изменения входной мощности на шести актуаторах (3-8) полученная в результате расчетов. Исходными данными для расчетов была предсказанная с помощью ИИ ветровая ситуация (Рис.1). Вычисления производились применительно к ветровой ситуации, изменяющейся в течении 65 с. с интервалом в 5 с. Из диаграммы следует, что при скачкообразном изменении скорости ветра при  $T=45$ с.изменились усилия растяжения в актуаторах 3,7 и усилие сжатия в противоположном актуаторе 8. Эти результаты свидетельствуют об адекватности расчетов. Для согласования направления ветра с расчетной моделью направление ветра измеряется от Севера. В модели Север проходит от центра платформы через узел С. При монтаже ПВЭС это направление должно выдерживаться. Следует отметить, что по алгоритму представленному в работах [6,7] силы реакции актуаторов определялись по заданной скорости ветра в зависимости от приращения угла поворота РО и в зависимости от изменения направления ветра. В

представленном модифицированном алгоритме силы реакции актуаторов определяются при заданном предельном угле повороте РО, в зависимости от скорости и направления ветра, изменяющихся по закономерностям, полученным методом искусственного интеллекта. Полученные результаты могут быть использованы для проектирования актуаторов ПВЭС. Также в дальнейшем планируется использовать результаты данной работы для экспериментального определения КПД прототипа актуатора и ПВЭС в целом.

#### Информация о финансировании.

Данное исследование профинансировано Комитетом науки Министерства науки и высшего образования Республики Казахстан (грант № AP14869386).

#### Выводы

В статье обосновано, что актуатор является основным функциональным элементом ПВЭС и подчеркивается важность определения энергетических характеристик актуатора для того, чтобы оценить энергетическую эффективность ПВЭС. В связи с этим в статье ставится задача определить энергию воспринимаемую актуаторами для того, чтобы на их основе оценить энергетическую эффективность актуатора и ПВЭС. Для решения поставленной задачи в качестве исходных данных использованы результаты анализа ветровой нагрузки и определения предсказанной ветровой ситуации с помощью методов искусственного интеллекта. На основе этих данных по модифицированному алгоритму с применением ПП «Mathcad» вычислена входная мощность от ветровой нагрузки, действующая на каждый актуатор манипулятора. Полученные в результате расчетов данные по входной мощности актуаторов позволяют оценить конструкции актуаторов и судить об энергоэффективности ПВЭС. В статье создается потенциал для широкого внедрения ПВЭС в ветроэнергетическую отрасль.

#### СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

- 1 Sills, J., and Firestone, J. Wind energy: A human challenge. [Text] // Science 366. – 2019. – P. 1206.
- 2 Tong, W. Fundamentals of wind energy: WIT Transactions on State of the Art in [Text]// Science and Engineering. – 2010. – Vol 44. – P. 3-48.
- 3 Karad, S., and Thakur, R. Efficient monitoring and control of wind energy conversion systems using Internet of things (IoT): a comprehensive review. [Text]// Environ. Dev.Sustain. – 2021. – Vol.23. – P. 14197–14214.
- 4 Banna, H. U., Luna A., Ying S., Ghorbani H., Rodriguez P. Impacts of wind energy in-feed on power system small signal stability: International Conference on Renewable Energy Research and Applications (ICRERA) [Text]// Milwaukee: IEEE. – 2014. – P. 615–622.

5 Premalatha, M., Abbasi, T., and Abbasi, S. A., Wind energy: Increasing deployment, rising environmental concerns, Renewable and Sustainable [Text] // Energy Rev. – 2014. – Vol. 31. – P. 270-288.

6 Sholanov, K. S., Mirzabayev, B. I., Ceccarelli, M. Expansibility of Electric Power Production by Sail Wind Power Stations: [Text]// International Journal of Mechanics and Control. – 2021. – Vol. 22(02). – P. 117–126.

7 Sholanov, K., Omarov, A., Ceccarelli, M. Improving efficiency of converting wind energy in modified sail wind power station [Text] //International Journal of Mechanics and Control. – 2022. – Vol. 23(02). – P. 101-110.

8 Sholanov, K. S. Parallel Manipulators of Robots: Theory and Applications. // Springer. – 2020. – P.164.

9 Шоланов, К. С., Омаров, А. С. Описание конструкции и технологии преобразования энергии ветра электростанций с зонтовым парусом [Текст] // Вестник Торайғыров университета. Энергетическая серия. – 2022. – № 3. – С. 211-223.

10 Шоланов, К. С., Токишева, Г. С. и др. Формирование данных для проектирования парусных ветровых электростанций [Текст]// Вестник Торайғыров университета. Энергетическая серия. – 2024. – №2. – С 421–432.

## REFERENCES

1 Sills, J., and Firestone, J. Wind energy: A human challenge. [Text] // Science 366. – 2019. – P. 1206.

2 Tong, W. Fundamentals of wind energy: WIT Transactions on State of the Art in [Text]// Science and Engineering. – 2010. – Vol 44. – P. 3–48.

3 Karad, S., and Thakur, R. Efficient monitoring and control of wind energy conversion systems using Internet of things (IoT): a comprehensive review. [Text]// Environ. Dev.Sustain. – 2021. – Vol.23. – P. 14197–14214.

4 Banna, H. U., Luna A., Ying S., Ghorbani H., Rodriguez P. Impacts of wind energy in-feed on power system small signal stability: International Conference on Renewable Energy Research and Applications (ICRERA) [Text]// Milwaukee: IEEE. – 2014. – P. 615-622.

5 Premalatha, M., Abbasi, T., and Abbasi, S. A., Wind energy: Increasing deployment, rising environmental concerns, Renewable and Sustainable [Text] // Energy Rev. – 2014. – Vol. 31. – P. 270–288.

6 Sholanov, K. S., Mirzabayev, B. I., Ceccarelli, M. Expansibility of Electric Power Production by Sail Wind Power Stations: [Text]// International Journal of Mechanics and Control. – 2021. – Vol. 22(02). – P. 117–126.

7 Sholanov, K., Omarov, A., Ceccarelli, M. Improving efficiency of converting wind energy in modified sail wind power station [Text] //International Journal of Mechanics and Control. – 2022. – Vol. 23(02). – P. 101-110.

8 Sholanov, K. S. Parallel Manipulators of Robots: Theory and Applications. // Springer. – 2020. – P.164.

9 Sholanov, K. S., Omarov, A. S. Opisanie konstrukcii i tekhnologii preobrazovaniya energii vetra elektrostanciej s zontovym parusom [Description of the design and technology of wind energy conversion by an umbrella sail power plant][Text] // Bulletin of the Toraighyrov University. Energy series. - 2022. – No. 3. – P. 211-223.

10 Sholanov, K. S., Tokisheva, G. S., etc. Formirovanie dannyh dlya proektirovaniya parusnyh vetrovyh elektrostancij: Vestnik Torajgyrov universiteta [Data generation for the design of sailing wind farms] [Text]// Bulletin of the Toraighyrov University. Energy series. – 2024. – No. 2. – P. 421-432.

Поступило в редакцию 07.08.24

Поступило с исправлениями 13.12.24

Принято в печать 10.03.25

*К. С.Шоланов, Н. Б. Жакипов, \*Г. Ж. Асаинов,*

*С. Сейфуллин атындағы Қазақ агротехникалық зерттеу университеті,*

*Қазақстан Республикасы, Астана қ*

*07.08.24 ж. баспаға түсті.*

*13.12.24 ж. түзетулерімен түсті.*

*10.03.25 ж. басып шығаруға қабылданды.*

## ЖЕЛКЕНДІ ЖЕЛ ЭЛЕКТР СТАНЦИЯСЫНЫҢ АКТУАТОРЛАРЫ ҚАБЫЛДАЙТЫН ЖЕЛ ЖҮКТЕМЕСІНІҢ ЭНЕРГИЯСЫ

*Мақала желкенді жел электр станциясының (ПВЭС) манипуляторлық түрлендіргішінің актуаторларын энергетикалық талдауға арналған.*

*ПВЭС-те желдің жел жүктемесінен механикалық энергия параллель манипулятордың алты актуаторында «ұйымдастырылған» қозғалыстарға айналады. Содан кейін әр актуатордағы осы қозғалыстардың механикалық энергиясы актуаторларға енгізілген генераторлар шығаратын электр энергиясына айналады. Мақалада бағдарламалық жасақтаманың көмегімен пвэс-тің энергетикалық тиімділігін бағалау үшін актуаторлар қабылдаған энергияны анықтау міндеті қойылады. Тапсырманы шешу үшін жел*

жүктемесін талдаудың және жасанды интеллект әдістерін қолдана отырып болжаланған жел жағдайын анықтаудың бұрын алынған нәтижелері қолданылады. Осы мәліметтер негізінде «Mathcad» ПП көмегімен өзгертілген алгоритм бойынша манипулятордың әрбір актуаторына әсер ететін жел жүктемесінен кіріс қуаты есептеледі және зерттеледі. Есептеу нәтижесінде алынған деректерді актуаторлардың параметрлерін таңдау және негіздеу үшін пайдалану ұсынылады. Манипуляторлық түрлендіргіштің актуаторлары функционалды түрде ПВЭС-тің маңызды құрамдас бөлігі болып табылатыны белгілі. Актуаторлардың конструкциясын жетілдіру жалпы ПВЭС-тің энергетикалық тиімділігін арттыруға мүмкіндік береді. Бұрын жүргізілген зерттеулер ПВЭС жел бағытының өзгеруіне қарамастан Желдің жылдамдығы 2,5 м/с және одан жоғары болған кезде 5-10 кВт электр энергиясын өндіре алатынын көрсетті. Осы және басқа да ерекшеліктері бойынша ПВЭС турбиналық жел электр станцияларынан асып түседі және оларды автономды энергия көздері ретінде үлкен шығындарсыз қолдануға болады.

*Кілтті сөздер:* актуаторлар, генератор, манипулятор түрлендіргіші, жаңартылатын энергия көздері, желкенді жел электр станциясы

K. S.Sholanov, N. B. Zhakipov, \*G. Zh. Assainov  
Kazakh agrotechnical research university named after S. Seifullin,  
Republic Of Kazakhstan, Astana.  
Received 07.08.24  
Received in revised form 13.12.24  
Accepted for publication 10.03.25

## WIND LOAD ENERGY PERCEIVED BY ACTUATORS OF A SAILING WIND FARM

*The article is devoted to the energy analysis of actuators of the manipulator converter of a sailing wind power plant (PVES).*

*In the PVP, mechanical energy from the wind load of the wind is converted into “organized” movements in six actuators of the parallel manipulator. The mechanical energy of these movements in each actuator is then converted into electrical energy produced by the generators embedded in the actuators. The article sets the task of determining the energy received by actuators to assess the energy efficiency of pves using*

*software. To solve the task, the previously obtained results of wind load analysis and determination of the predicted wind conditions using artificial intelligence methods are used. Based on this data, the input power from the wind load acting on each actuator of the manipulator is calculated and studied according to a modified algorithm using PP “Mathcad”. It is recommended to use the data obtained as a result of the calculation to select and justify the parameters of the actuators. It is known that actuators of manipulator transducers are functionally an important component of PVES. Improving the design of actuators will increase the energy efficiency of PVPS as a whole. Previous studies have shown that PVES can generate 5-10 kW of electricity at wind speeds of 2.5 M/S and higher, regardless of the change in wind direction. In terms of these and other features, PVES surpasses turbine wind farms and can be used as autonomous energy sources without large losses*

*Keywords:* actuators, actuators, generator, manipulator converter, renewable energy sources, sailing wind farm



<https://doi.org/>

\*Ә. О. Юсупова<sup>1</sup>, А. О. Потапенко<sup>2</sup>, Д. М. Рахимбердинова<sup>3</sup>, Е. Н. Колесников<sup>4</sup>

<sup>1,2,3,4</sup>Торайғыров университет, Республика Казахстан, г. Павлодар

<sup>1</sup>ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-5516-3024>

<sup>2</sup>ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-9523-5333>

<sup>3</sup>ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-2985-9498>

<sup>4</sup>ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-2334-5146>

\*e-mail: [aselasp@mail.ru](mailto:aselasp@mail.ru)

## ӨЛШЕУ ТҮРЛЕНДІРГІШІНІҢ ЭЛЕКТР СЫЙЫМДЫЛЫҒЫН МОДЕЛЬДЕУ

Қазіргі заманғы айналмалы электр машиналары электр энергетикасында энергия түрлерін түрлендірудің негізгі жетектері ретінде кеңінен қолданылады. Ұсынылған жұмыста электр машиналары роторының эксцентриситетін диагностикалау үшін жалпақ электродтары бар өлшеу түрлендіргішінің сыйымдылығын модельдеу және анықтау жүргізілді. Өндірісте диагностика үшін өлшеу түрлендіргіштері кеңінен қолданылады, олардың арасында сыйымдылықты өлшеу түрлендіргіштері маңызды орын алады. Түрлендіргіштердің кез-келген түрін пайдалану қуат схемасына қосылуды қамтамасыз етеді. Мақалада егжей-тегжейлі талдау және өлшеу түрлендіргіштерінің сыйымдылығын өлшеудің ең қолайлы схемасын одан әрі таңдау үшін қолданыстағы түрлендіру және өлшеу өлшеу тізбегінің конструкциялары қарастырылады. Диагностика жүйесінің арнайы талаптарына жауап беретін диагностикалық құрылғының қолданыстағы блок-схемаларына сәйкес жоғары жиілікті генератор, өлшеу көпірінен алынған өлшеу тізбегі және генератордың резонанстық жиілігіне реттелген жолақты өткізгіш сүзгі, сондай-ақ тұрақтандырылған тұрақты кернеудің дербес көзі диагностикалық жүйенің элементтері болып табылады. Өлшеу схемасындағы қарай ауа саңылауының қозғалысын түрлендіру ең қарапайым және қолайлы түрлендіру болып табылады, мұнда міндет тек өлшеу органының инсульт шамасын қашықтықтан өлшеуге дейін азаяды, соңғысын талдау арқылы өлшеулер жүргізуге солай болады.

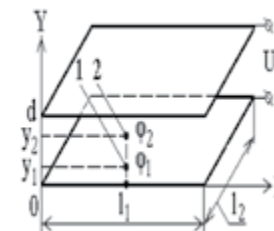
*Кілтті сөздер:* сыйымдылықты өлшеу түрлендіргіштері, ауа саңылауы, ротордың эксцентриситеті, өлшеу схемасы, көпір тізбектері, өлшеу схемаларын талдау.

### Кіріспе

Электр энергетикасында, мысалы, электр машиналарын (ЭМ) диагностикалау кезінде олардың қарапайымдылығы мен сенімділігіне байланысты электр машиналары элементтерінің қозғалысын өлшеу сыйымдылықты өлшеу түрлендіргіштері арқылы жүзеге асырылатын әдістер барған сайын танымал бола бастады [1, 117-б.]. Өздеріңіз білетіндей [2, 7-б.], бұл түрлендіргіштердің сыйымдылығының өзгеруі машинаның бақыланатын элементін жылжыту арқылы ғана емес, оны білікке айналдыру арқылы да болуы мүмкін. Мұның ең жарқын мысалы-жұмыс кезінде ротордың эксцентриситетін өлшеу, электродтардың біреуі тұрақты геометриялық өлшемдерге ие, ал екіншісі ротордың айналмалы тісті өзегінің бетімен ұсынылған кезде.

### Материалдар мен әдістері

Осыған байланысты ротордың айналу процесінде өлшеу түрлендіргішінің сыйымдылығы мезгіл-мезгіл өзгеріп отырады және ротордың эксцентриситетін диагностикалау құралдарын әзірлеу ротордың ЭМ жағдайына байланысты осы сыйымдылықты модельдеусіз мүмкін болмайды. Өздеріңіз білетіндей [3, 5-7-бб.; 4, 271-б.; 5, 10-б.], электродтардың әртүрлі формалары бар сыйымдылықты анықтаудың көптеген әдістері бар. Алайда, олардың талдауы олардың кейбіреулерін есептеу техникасын қолданған кезде де жүзеге асыру өте қиын екенін көрсетті. Басқалары электрод бетінің ерекше жағдайларын ғана қарастыруға мүмкіндік береді. Қалғандары қажетті дәлдікті қанағаттандырмайды [6, 595-б.]. Осыған байланысты еркін пішінді электродтардың екі с электр сыйымдылығын келесідей анықтау ұсынылады.



Сурет 1 –электродтар арасындағы сыйымдылық зарядының таралуы

Сәйкес [3, 17-б.] Осы конденсатордың екі электродының арасындағы кез келген нүктедегі электростатикалық потенциалдық өрістің кернеулігі тұрақты шама болып табылады. Осыған байланысты және 1-сурет.

$$E = \frac{U}{d} = \frac{\varphi_2 - \varphi_1}{y_2 - y_1} = \frac{\Delta\varphi}{\Delta y}, \quad (1)$$

мұндағы  $\varphi_1$  және  $\varphi_2$  және – конденсатордың төменгі пластинасына қатысты 1 және 2 нүктелердегі электростатикалық өрістің потенциалдары;  $y_1$  және  $y_2 - 1$  және 2 нүктелерінің координаттары;  $U$  және  $d$  – конденсатордың электродтары арасындағы кернеу мен қашықтық. Содан кейін (1) теңдеудің арақатынасын ескере отырып, жазық конденсатордың сыйымдылығын анықтау үшін эмпирикалық тәуелділікті қолдануға болады

Содан кейін (1) теңдеудің арақатынасын ескере отырып, жазық конденсатордың сыйымдылығын анықтау үшін эмпирикалық тәуелділікті қолдануға болады

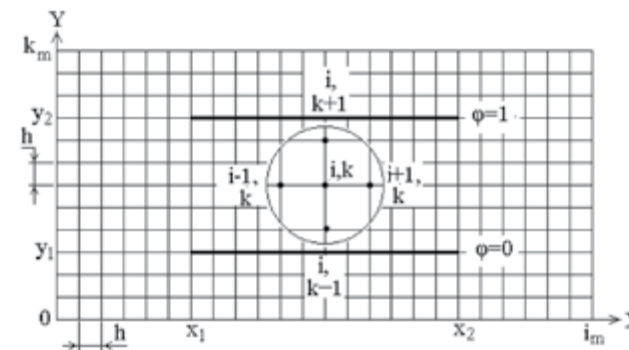
$$C = \varepsilon_0 l_1 l_2 \frac{\varphi_2 - \varphi_1}{y_2 - y_1} = \frac{\Delta\varphi}{\Delta y}, \quad (2)$$

мұндағы  $l_1$  және  $l_2$  және – конденсатор электродтарының ені мен ұзындығы.

Конденсатордың электростатикалық өрісі потенциалды болғандықтан және электр өрісінің бос көздері болмағандықтан, 1-суреттегі схеманы ескере отырып және [6, 699-б.: 7, 15-б.] оны сипаттау үшін Лаплас теңдеуі қолданылады.

$$C = \varepsilon_0 l_1 l_2 \frac{\varphi_2 - \varphi_1}{y_2 - y_1} = \frac{\Delta\varphi}{\Delta y}. \quad (3)$$

Талдаудан [6, 585-б.] электродтардың күрделі түрінде (3) теңдеуді тікелей шешу арқылы аналитикалық өрнекті алу қиын, кейде шешілмейтін мәселе болып көрінетіні анық. Сонымен қатар, бұл тор әдісін жеткілікті түрде басқаруға мүмкіндік беретіні белгілі [6, 698-б.].



Сурет 2 – есептеу схемасы

Өлшеу түрлендіргішінің электродтары арасындағы электростатикалық өрісті модельдеу үшін тор әдісін қолданған кезде зерттелетін аймақ 2-суретте көрсетілгендей жағы бар төртбұрышты жасушаларға бөлінеді. Бұл жағдайда қатардағы және бағандағы жасушалар саны сәйкесінше  $k_m$  және  $i_m$ -ге тең қабылданады. Шекаралық шарттар ретінде өлшеу түрлендіргішінің электродтарының потенциалдары қабылданады. Іске асырудың қарапайымдылығы үшін жоғарғы электродтың потенциалы бір, ал төменгі электродтың потенциалы нөлге тең деп қабылданады. Бұл жағдайда 2-суреттегі  $i, k$  түйіні үшін Пуассон (3) теңдеуінің ішінара туындылары өрнектермен ауыстырылады.

$$\frac{\partial^2 \varphi_x}{\partial y^2} \approx \frac{\varphi_{x(i,k+1)} - 2\varphi_{x(i,k)} + \varphi_{x(i,k-1)}}{h^2}; \quad (4)$$

$$\frac{\partial^2 \varphi_x}{\partial z^2} \approx \frac{\varphi_{x(i+1,k)} - 2\varphi_{x(i,k)} + \varphi_{x(i-1,k)}}{h^2}.$$

Нәтижесінде  $i, k$  түйінінде потенциал

$$\varphi_{x(i,k)} = \frac{1}{4} (\varphi_{x(i+1,k)} + \varphi_{x(i-1,k)} + \varphi_{x(i,k+1)} + \varphi_{x(i,k-1)}) \quad (5)$$

Бұл жүйе компьютерде итерация әдісі бойынша шешіледі, ол төменгі сол жақ бұрыштан, содан кейін жоғарғы оң жақ бұрыштан есептеуді қамтамасыз етеді, әр итерациядан кейін шекаралық шарттар жаңартылып, қайта қабылданады. Итерациялар саны ең аз қателіктерге жету үшін таңдалады.

Өздеріңіз білетіндей [7, 117-б.], екі электродтың сыйымдылығын келесідей анықтауға болады

$$C = \epsilon \epsilon_0 S / d = \epsilon \epsilon_0 h l / d, \quad (6)$$

мұндағы  $l$  және  $h$  – электродтың ұзындығы мен ені.

Осылайша, сыйымдылық тақталары арасында электрлік потенциал өрісі пайда болады. Осы потенциалды есептеу үшін қарастырылған тор әдісін қолдануға болады. Демек, тор әдісімен сыйымдылықты есептеу үшін (2)-(4) өрнегін ескере отырып, келесі эмпирикалық формуланы қолдануға болады. соңғы геометриялық бөлімдердің екі электродтары бар сыйымдылықты түрлендіргішке арналған сыйымдылық

$$C = \frac{(\varphi_1 - \varphi_2) U \epsilon \epsilon_0 S}{\Delta h} \quad (7)$$

Содан кейін (7) ескере отырып, өрнектер (5-6) форманы алады

$$U = \frac{\varphi_{x(i+1,k)} - \varphi_{x(i,k)}}{h} d \quad (8)$$

$h$  – 2-суретке сәйкес таңдалған тор әдісіне сәйкес бір ұяшықтың ұзындығы мен ені.

$$C = \frac{(\varphi_{x(i+1,k)} - \varphi_{x(i,k)}) \epsilon_0 S}{\Delta h} \quad (9)$$

Сонымен қатар, өрнектегі потенциалдар айырмасы (9) шекаралық шарттармен анықталады, ал шама сыйымдылық түрлендіргішінің сенсорының платиналары арасындағы кернеуді білдіреді. (9) теңдеуді тікелей шешуге болады, мысалы, компьютерлерді қолдана отырып, Гаусс әдісі бойынша.

### Нәтижелер және талқылау

Сыйымдылықты дәстүрлі түрде анықтайтын (7) математикалық өрнектен көрініп тұрғандай [8, 133-б.], пластиналардың тұрақты шамасында конденсатордың сыйымдылығы пластиналар арасындағы қашықтыққа байланысты, яғни Өлшемдері 1-кестеде келтірілген ауа саңылауының шамасымен анықталады. Берілген тапсырмаға сәйкес электродтар арасындағы электр өрісінің потенциалдары арқылы модельдеу арқылы эксперименттік жолмен алынған есептік өрнек (9) уақыт бойынша өзгеретін электродтары бар өлшеу түрлендіргішінің сыйымдылығын анықтауға мүмкіндік береді.

Кесте 1–ЭМ – дегі ауа саңылауларының шамасы

Айналу жиілігі, айн / мин	Саңылау, мм, қозғалтқыш қуаты кезінде, кВт							
	До 0,2	0,2-1	1-2,5	2,5-5	5-10	10 - 20	20-50	50-100
500-1500	0,2	0,25	0,3	0,35	0,4	0,4	0,5	0,65
3000	0,25	0,3	0,35	0,4	0,5	0,65	0,8	1

Модельдің сәйкестігін тексеру үшін 3 – суретте көрсетілгендей жазық тұрақты пішінді электродтары бар жалпақ өлшеу түрлендіргішін тексеру құралы ретінде алыңыз, екі жолмен-алынған өрнек (10) және классикалық өрнек (7).

Қабылданған модельге сәйкес, қабылданған әдіс тор әдісі екенін ескере отырып, ұяшықтар саны, біз ыңғайлы болу үшін  $im=11$ -ге тең боламыз және электродтардың барлық мәндері мен геометриялық параметрлерін торлар санында білдіреміз. Сонымен,  $im\Delta = l$  электродтың ұзындығы шартты түрде бірлікке тең болады.

Электродтардың электр өрісін есептеу аймағының бүкіл еніне модельдеу және осы электродтардың сыйымдылығын есептеу, сондай-ақ осы сыйымдылықтың шамасын Turbo Basic бағдарламасында классикалық формула бойынша алынған сыйымдылықпен салыстыру. Электрод 1 қозғалыссыз, сондықтан оның бүкіл бетіндегі потенциал бірлікке тағайындалады, электрод 2, өз кезегінде, оның астындағы өріс сияқты, нөлге тең потенциалға ие. Осылайша, электр өрісі 2-суретте көрсетілгендей  $d$  қашықтық аймағында есептеледі, а. Есептеулер кезінде мынадай жорамалдар қабылданады:

1 Біз шартты түрде 1-суретте көрсетілген шеткі қосымша контейнерлерді елемейміз

2 Сондай-ақ, біз олардың шамалы мөлшеріне байланысты сымдар мен ЭМ бөліктерінің бетінен қосымша ыдыстарды ескермейміз.

Электродтардың әртүрлі формалары бар сыйымдылықты есептеудің бірнеше мысалын қарастырыңыз.

Шамасы үшін біз 0,01 м аламыз.

Table with 30 columns and 30 rows of numerical data, likely representing simulation results for a specific model.

Сурет 3 – модельдеу схемасы және ұзын электродтар үшін есептелген мәліметтер-пластиналар

2, б-суретте электр өрісінің потенциалды желілерінің әртүрлі орын ауыстырулармен таралуы көрсетілген: 1 – u=0,1 мм кезінде; 2 – u=0,09 мм кезінде; 3 – u=0,07 мм кезінде; 4 – u=0,05 мм кезінде; 5 – u=0,03 мм кезінде; 6-u=0,01 мм. Біз шешімді компьютердің көмегімен жасалған модельдің көмегімен жасаймыз. Электродтар арасындағы қашықтық 0,22 ММ. Потенциалдар арқылы (9) өрнегімен есептелген сыйымдылық 1,998 пФ құрайды.

Сыйымдылығы, классикалық өрнегі (7) – 1,772 пФ. Осылайша, қателік 11, 31 % құрайды. Шешім бойынша қателік пайызы нәтижеге сәйкес шартты толығымен қанағаттандыратындықтан, есептелген модельді мәселені шешу үшін пайдалануға болады, атап айтқанда сыйымдылықты өлшеу түрлендіргішінің уақыт бойынша өзгеретін электродтары бар сыйымдылықты анықтауға болады [9, 106-б.].

Table with 30 columns and 30 rows of numerical data, similar to the first table, representing simulation results.

Сурет 4 – әртүрлі ұзындықтағы электродтарға арналған модельдеу схемасы және есептеу деректері (жиік түрі)

Өрнекпен есептелген сыйымдылық (9) потенциалдар арқылы төменнен 1,748 пФ және жоғарыдан 1,853 пФ құрайды. 390

Table with 30 columns and 30 rows of numerical data, similar to the first table, representing simulation results.

Сурет 5 –әр түрлі пішіндегі электродтарға арналған модельдеу схемасы және есептеу деректері (Тіс түрі)

Өрнекпен есептелген сыйымдылық (10) потенциалдар арқылы төменнен 3,239 пФ және жоғарыдан 0,086 пФ құрайды [10, 102-б.].

Қорытынды

Жоғарыда келтірілген мысалдан, ұсынылған әдіс IP сыйымдылығын қарапайым және қолайлы дәлдікпен модельдеуге мүмкіндік беретіні анық, мысалы, ротордың эксцентриситетін диагностикалау жүйесі үшін және электродтардың пішініне қарамастан.

ПАЙДАЛАНЫЛҒАН ӘДИБИЕТТЕР ТІЗІМІ

- 1 Иванов-Смоленский, А. В. Электрические машины. – Москва: Энергия, 1980. – 909с.
2 Новожилов, А. Н., Юсупова, А. О., Потапенко, А. О. Метод моделирование электрической емкости измерительного преобразователя. – Москва: Журнал «Вестник Машиностроения», №9, 2021, г.
3 Novozhilov, A., Potapenko, A., Novozhilov, T. Simulation of voltage on the stator winding terminals of induction motor with impaired short-circuit winding of rotor, «Applied Mechanics and Materials» Vol. 792 – 2015. – 5 p.
4 Novozhilov, A., Potapenko, A., Novozhilov, T. Process Simulation in Induction Motor where Short-Circuit Rotor Bar is Failed during Run-down Regime Przeglad elektrotechniczny, ISSN 0033-2097, R. 94 NR 6/2018.
5 Новожилов, А. Н., Юсупова, А. О., Новожилов, Т. А. Выбор метода выявления эксцентриситета ротора электрической машины / Вестник ПГУ. № 4. Серия Энергетическая – Павлодар, 2016, с. 117 – 126.
6 Новожилов, А. Н., Юсупова, А. О., Новожилов, Т. А. Выбор типа емкостного измерительного преобразователя для диагностики

эксцентриситета ротора электрической машины / Материалы международной конференции «17 Сатпаевские чтения», том 19, с. 133-138.

7 **Novozhilov, A., Yussupova A., Assainov, G., Novozhilov, T., Manukovsky, A.** Sources of independent power supply for protection relay/ Przeglad Elektrotechniczny, № 5, 2018, P. 23-26.

8 **Novozhilov, A., Yussupova A., Novozhilov, T, A.** A Device for Determining the Rotor Eccentricity of Rotating Electric Machines. Russian Electrical Engineering, № 2, P. 32-35

9 **Novozhilov, A., Yussupova A., Novozhilov, T, A.** Determining the Displacement of the Rotor Shaft in an Electrical Machine. Russian Engineering Research, 2019, No. 10, pp. 827–830. Allerton Press, Inc., 2019.

10 **HuT, H. L., XuS, M., Hui, E.** A high-accuracy, high-speed interface circuit for differential-capacitance transducer. / [Sensors and Actuators A: Physical. Volume 125, Issue 2](#), 10 January 2006, P. 329–334.

#### REFERENCES

1 **Ivanov-Smolensky, A. V.** Electrichekieskie mashini. [Electric machines.] [Text]/ Ivanov-Smolensky A.V. – Moscow: Energiya, 1980 – 909 p.

2 **Novozhilov, A. N., Yussupova, A. O., Potapenko, A. O.** Metod modelirovaniya electrichekieskoi emkosti izmeritelnogo preobrazovatelya. [Method of modeling the electrical capacitance of a measuring converter] [Text]/ The journal «Bulletin of Mechanical Engineering», Novozhilov A.N., Yusupova A.O., Potapenko A.O. No. 9, 2021, Moscow.

3 **Novozhilov, A., Potapenko A., Novozhilov. T.** [Simulation of voltage on the stator winding terminals of induction motor with imposed short-circuit winding of rotor] [Text]/ «Applied Mechanics and Materials». Novozhilov, A., Potapenko A., Novozhilov. Vol. 792 - 2015 – 5 p.

4 **Novozhilov, A., Potapenko A., Novozhilov. T.** [Process Simulation in Induction Motor where Short-Circuit Rotor Bar is Failed during Run-down Regime] [Text]/ Przeglad elektrotechniczny. Novozhilov, A., Potapenko A., Novozhilov. ISSN 0033-2097, R. 94 NR 6/2018

5 **Novozhilov, A. N., Yussupova, A. O., Novozhilov, T. A.** Vibor metoda viyavleniya exentrisiteta rotora electrichekieskoi mashini. [The choice of a method for detecting the eccentricity of the rotor of an electric machine] [Text]/ Bulletin of PSU. No. 4. A.N. Novozhilov, A.O. Yusupova, T.A. Novozhilov. Energy Series – Pavlodar, 2016, P. 117 – 126.

6 **A Novozhilov, A. N., Yussupova, A. O., Novozhilov, T. A.** Vibor tipa emkostnogo izmeritelnogo preobrazovatelya dlya diagnostiki exentrisiteta rotora electrichekieskoi mashini. [Selection of the type of capacitive measuring transducer

for the diagnosis of the eccentricity of the rotor of an electric machine] [Text]/ Materials of the international conversion «A. N. Novozhilov, A. O. Yusupova, T.A. Novozhilov. 17 Satpayev readings», volume 19, pp. 133-138.

7 **Novozhilov, A., Yussupova A., Assainov, G., Novozhilov, T., Manukovsky, A.** [Sources of independent power supply for protection relay] [Text]/ Przeglad Elektrotechniczny, Novozhilov, A., Yussupova A., Assainov, G., Novozhilov, T., Manukovsky, A. № 5, 2018, pp. 23-26.

8 **Novozhilov, A., Yussupova A., Novozhilov, T, A.** [A Device for Determining the Rotor Eccentricity of Rotating Electric Machines]. [Text]/ Russian Electrical Engineering, Novozhilov, A., Yussupova A., Novozhilov, T, A., № 2, p. 32-35

9 **Novozhilov, A., Yussupova A., Novozhilov, T, A.** [Determining the Displacement of the Rotor Shaft in an Electrical Machine]. [Text]/ Russian Engineering Research, 2019, No. 10, pp. 827–830. Novozhilov, A., Yussupova A., Novozhilov, T, A. Allerton Press, Inc., 2019.

10 **HuT, H. L., XuS, M., Hui, E.** [A high-accuracy, high-speed interface circuit for differential-capacitance transducer]. [Text]/ [Sensors and Actuators A: Physical](#). H.L.HuT, M.XuS, E.Hui. [Volume 125, Issue 2](#), 10 January 2006, Pages 329-334.

11.12.24 ж. баспаға түсті.

20.01.25 ж. түзетулерімен түсті.

10.03.25 ж. басып шығаруға қабылданды.

\**A. O. Юсупова<sup>1</sup>, A. O. Потапенко<sup>2</sup>, Д. М. Рахимбердинова<sup>3</sup>*

*Е. Н. Колесников<sup>4</sup>*

<sup>1,2,3,4</sup>Торайғыров университет, Республика Казахстан, г. Павлодар

Поступило в редакцию 11.12.24

Поступило с исправлениями 20.01.225

Принято в печать 10.03.25

#### МОДЕЛИРОВАНИЕ ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ ЕМКОСТИ ИЗМЕРИТЕЛЬНОГО ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЯ

*Современные вращающиеся электрические машины широко используются в электроэнергетике в качестве основных приводов для преобразования видов энергии. В предложенной работе проведено моделирование и определение емкости измерительного преобразователя с плоскими электродами для диагностики*

*эксцентриситета Ротора электрических машин. В производстве для диагностики широко используются измерительные преобразователи, среди которых важное место занимают емкостные измерительные преобразователи. Использование любого типа преобразователей обеспечивает подключение к схеме питания. В статье рассматриваются конструкции существующих схем преобразования и измерения для детального анализа и дальнейшего выбора наиболее подходящей схемы измерения емкости измерительных преобразователей. В соответствии с действующими блок-схемами диагностического устройства, отвечающими специальным требованиям диагностической системы, элементами диагностической системы являются высокочастотный генератор, измерительная цепь, полученная от измерительного моста, и полосовой проводящий фильтр, настроенный на резонансную частоту генератора, а также самостоятельный источник стабилизированного постоянного напряжения. Преобразование движения воздушного зазора в измерительной схеме является самым простым и приемлемым преобразованием, где задача сводится только к дистанционному измерению величины хода измерительного органа, измерения можно проводить путем анализа последнего.*

*Ключевые слова: Емкостные измерительные преобразователи, воздушный зазор, эксцентриситет ротора, схема измерения, мостовые схемы, анализ схем измерения.*

*\*A.O. Yussupova<sup>1</sup>, A.O. Potapenko<sup>2</sup>, D. M. Rakhimberdinova<sup>3</sup>,  
E. N. Kolesnikov<sup>4</sup>*

*<sup>1,2,3,4</sup>Toraighyrov University, Republic of Kazakhstan, Pavlodar*

*Received 11.12.24*

*Received in revised form 20.01.25*

*Accepted for publication 10.03.25*

## MODELING OF THE ELECTRIC CAPACITY OF THE WORKER

*Modern Rotary electric machines are widely used in the electric power industry as the main drives for converting types of energy. In the presented work, modeling and determination of the capacitance of a measuring transducer with flat electrodes was carried out to diagnose the eccentricity of the rotor of electric machines. In production, measuring transducers are widely used for diagnostics, among which capacitive*

*measuring transducers occupy an important place. The use of any type of converters provides connection to the power circuit. The article discusses the existing conversion and measurement circuit designs for a detailed analysis and further selection of the most suitable scheme for measuring the capacity of measuring transducers. According to the existing block diagrams of the diagnostic device, which meet the special requirements of the diagnostic system, a high-frequency generator, a measuring circuit from a measuring Bridge and a band-pass filter tuned to the resonant frequency of the generator, as well as an independent source of stabilized constant voltage, are elements of the diagnostic system. The conversion of the movement of the air gap in the measurement scheme is the simplest and most acceptable conversion, where the task is reduced only to remote measurements of the stroke value of the measuring body, measurements can be made by analyzing the latter.*

*Keywords: capacitive measuring transducers, air gap, rotor eccentricity, measurement scheme, bridge circuits, analysis of measurement schemes.*

## АВТОРЛАР ТУРАЛЫ АҚПАРАТ

**Ауезханов Дархан Азаматович**, «Автоматтандыру және басқару» (й) мамандығы бойынша докторант, энергетика факультеті, С. Сейфуллин атындағы Қазақ агротехникалық зерттеу университеті, г Астана, 010011, Қазақстан Республикасы, e-mail: [dauyezkhhanov@gmail.com](mailto:dauyezkhhanov@gmail.com), <https://orcid.org/0009-0006-4164-1033>.

**Акаев Айбек Муратбекович**, PhD, Сәулет құрылыс және энергетика мектебі, Д. Серікбаев атындағы Шығыс Қазақстан техникалық университеті, Өскемен қ., 070000, Қазақстан Республикасы, E-mail: [aybek.akaev.vko\\_81@mail.ru](mailto:aybek.akaev.vko_81@mail.ru), <https://orcid.org/0000-0001-9390-5703>

**Арыстанбаев Құттыбек Есенгелдыұлы**, техника ғылымдарының кандидаты, «Фармацевтикалық өндіріс технологиясы» кафедрасының доценті, АҚ «Оңтүстік Қазақстан медицина академиясы», Шымкент қ., 160001, Қазақстан Республикасы, e-mail: [201ukgu@mail.ru](mailto:201ukgu@mail.ru), <https://orcid.org/0000-0002-9499-192X>

**Арипова Назгуль Михайловна**, Жылуэнергетика кафедрасының докторанты, Торайғыров университеті, Павлодар қ., 140008, Қазақстан Республикасы, e-mail: [nazgul\\_2010@mail.ru](mailto:nazgul_2010@mail.ru), <https://orcid.org/0000-0003-2760-8617>

**Алдияров Абдурахман Уалиевич**, физика-техникалық факультетінің профессор м.а., әл-Фараби атындағы ҚазҰУ, Алматы қ., 050040, Қазақстан Республикасы, e-mail: [abdurakhman.aldiyarov@kaznu.kz](mailto:abdurakhman.aldiyarov@kaznu.kz), <https://orcid.org/0000-0002-5091-7699>

**Анарбаев Алибек Ерсайнович**, аға оқытушы, энергетика факультеті, Торайғыров университеті, Павлодар қ., 140008, Қазақстан Республикасы, e-mail: [alibek\\_anarbaev@mail.ru](mailto:alibek_anarbaev@mail.ru), <https://orcid.org/0000-0001-6890-8005>

**Ауесхан Ақниет Алмасханқызы**, магистрант, Л. Н. Гумилев атындағы Еуразия ұлттық университетінің «Электроэнергетика» кафедрасы, Қазақстан Республикасы, Астана қ., 010009, Қазақстан Республикасы, e-mail: [a.aueskhan@inbox.ru](mailto:a.aueskhan@inbox.ru), <https://orcid.org/0009-0001-1591-6789>

**Аринова Анар**, Ассистент зерттеуші, ғылым магистрі, Назарбаев университет, Астана қ., 010000, Қазақстан республикасы, e-mail: [Anar.arinova@nu.edu.kz](mailto:Anar.arinova@nu.edu.kz), <https://orcid.org/0000-0002-7780-4555>

**Ақбаров Дилмурод**, докторант, «Ташкент ауыл шаруашылығын ирригациялау және механикаландыру инженерлері институты», лекротехнология және электр жабдықтарын қолдану кафедрасы, 100000 Ташкент қаласы, Өзбекстан Республикасы, e-mail: [dakbarov@umail.uz](mailto:dakbarov@umail.uz), <https://orcid.org/0000-0002-8689-0619>

**Айтуғанова Айша Меңлібайқызы**, педагогика ғылымдарының магистрі, Қорқыт Ата атындағы Қызылорда университеті, Инженерлі-технологиялық институты, Қызылорда қ., 020000, Қазақстан Республикасы, e-mail: [mag\\_zhan97@mail.ru](mailto:mag_zhan97@mail.ru), <https://orcid.org/0000-0002-8141-5157>

**Асаинов Гибрат Жоламанович**, PhD, «Электрмен жабдықтау» кафедрасының аға оқытушысы С. Сейфуллин атындағы Қазақ агротехникалық зерттеу университеті, Астана қ., 010000, Қазақстан Республикасы, e-mail: [asainovgibrat@gmail.com](mailto:asainovgibrat@gmail.com), <https://orcid.org/0000-0002-1330-5909>

**Баденова Жанар Рамазановна**, «Жылу энергетика» мамандығы бойынша докторант, Сәулет құрылыс және энергетика мектебі, Д. Серікбаев атындағы Шығыс Қазақстан техникалық университеті, Өскемен қ., 070000, Қазақстан Республикасы, e-mail: [janara1993m@mail.ru](mailto:janara1993m@mail.ru), <https://orcid.org/0009-0002-7326-1714>

**Ердыбаева Назгуль Кадырбековна**, физика-математика ғылымдарының докторы, Сәулет құрылыс және энергетика мектебі, Д. Серікбаев атындағы Шығыс Қазақстан техникалық университеті, Өскемен қ., 070000, Қазақстан Республикасы, e-mail: [nyerdybayeva@mail.ru](mailto:nyerdybayeva@mail.ru), <https://orcid.org/0000-0003-0314-0503>

**Бондарцев Давид Юрьевич**, PhD, профессор АЭЖБУ, ассоц. профессор ВАК, Г. Даукеев атындағы Алматы Энергетика және Байланыс университеті, Энергетика және жасыл технологиялар институты, Алматы қ., 050013, Қазақстан Республикасы, e-mail: [d.bondartsev@aes.kz](mailto:d.bondartsev@aes.kz), <https://orcid.org/0000-0001-8778-7851>

**Байсеитов Гани Нуралиевич**, техника ғылымдарының кандидаты, Президент «R&D Center «Kazakhstan Engineering»», Астана қ., 010000, Қазақстан Республикасы, e-mail: [baiseitov1970@mail.ru](mailto:baiseitov1970@mail.ru) идентификаторы: <https://orcid.org/0009-0001-0154-0071>

**Баянбаев Кайрат Амангельдинович**, аға оқытушы, Магистр-инженер, Қ. И. Сәтбаев атындағы Қазақ ұлттық зерттеу техникалық университеті (ҚазҰТУ), Алматы қ., 050013, Қазақстан Республикасы, e-mail: [k.bayanbayev@satbayev.university](mailto:k.bayanbayev@satbayev.university), <https://orcid.org/0000-0001-9635-0424>

**Бабахан Шохрух Абдилкасымович**, аға оқытушы, Қожа Ақмет Ясауи атындағы Халықаралық қазақ-түрік университеті, Түркістан қ., 161200, Қазақстан Республикасы, e-mail: [babakhan.shokhrukh@ayu.edu.kz](mailto:babakhan.shokhrukh@ayu.edu.kz), <https://orcid.org/0000-00027723-0045>

**Бергузинов Асхат Нұрланұлы**, PhD, профессор, Торайғыров университеті, Павлодар қ., 140008, Қазақстан Республикасы, e-mail: [askhat\\_berguzinov@mail.ru](mailto:askhat_berguzinov@mail.ru), <https://orcid.org/0000-0001-6954-8259>

**Генбач Александр Алексеевич**, Техникалық ғылым докторы, профессор ВАК, Ф. Даукеев атындағы Алматы Энергетика және Байланыс

Университеті, Энергетика және жасыл технологиялар институты, Алматы қ., 050013, Қазақстан Республикасы, e-mail: [a.genbach@aes.kz](mailto:a.genbach@aes.kz), <https://orcid.org/0009-0001-3819-4387>

**Дружинин Валерий Михайлович**, PhD, аға оқытушысы, Энергетика кафедрасы, Қарағанды индустриялық университеті, Теміртау қ., 101400, Қазақстан Республикасы, e-mail: [druzhinin\\_vm@mail.ru](mailto:druzhinin_vm@mail.ru), <https://orcid.org/0000-0001-7261-8780>

**Джаналиев Балатай Мұратұлы**, магистр, «Автоматтандыру, телекоммуникациялау және басқару» кафедрасы, М. Әуезов атындағы Оңтүстік Қазақстан университеті, Шымкент қ., 160001, Қазақстан Республикасы, e-mail: [balatai86.22@mail.ru](mailto:balatai86.22@mail.ru), <https://orcid.org/0009-0000-1474-5423>

**Дүйсенбек Жансая Серікқызы**, PhD, Инженериядағы экология және менеджмент кафедрасының ассистент профессоры, Г. Даукеев атындағы Алматы энергетика және байланыс университеті, Алматы қ., 050013, Қазақстан Республикасы, 010011, Қазақстан Республикасы, e-mail: [zhaniko.adina@mail.ru](mailto:zhaniko.adina@mail.ru), <https://orcid.org/0000-0001-7844-4240>

**Додаев Сұлтан**, магистр, әл-Фараби атындағы ҚазҰУ. Физика-техникалық факультеті, Жылу физикасы және техникалық физика кафедрасы. Алматы, 050040, Қазақстан Республикасы, e-mail: [dodaev230199@gmail.com](mailto:dodaev230199@gmail.com) <https://orcid.org/0009-0006-0357-4618>

**Ердыбаева Назгуль Кадырбековна**, физика-математика ғылымдарының докторы, Сәулет құрылыс және энергетика мектебі, Д. Серікбаев атындағы Шығыс Қазақстан техникалық университеті, Өскемен қ., 070000, Қазақстан Республикасы, e-mail: [nyerdybayeva@mail.ru](mailto:nyerdybayeva@mail.ru), <https://orcid.org/0000-0003-0314-0503>

**Есмаханова Лаура Нурлановна**, PhD, Автоматтандыру және телекоммуникация кафедрасы, Технологиялық факультет, М. Х. Дулати атындағы Тараз өңірлік университеті, Тараз қ., 080000, Қазақстан Республикасы, e-mail: [laura060780@mail.ru](mailto:laura060780@mail.ru), <https://orcid.org/0000-0002-3308-9676>

**Елеуова Эльмира Шорақызы**, Қорқыт Ата атындағы Қызылорда университетінің Су шаруашылығы және жерге орналастыру ББ аға оқытушысы, ауылшаруашылығы ғылымдарының кандидаты, 120000, Қызылорда қ., Қазақстан Республикасы, e-mail: [eleuovaelmira@mail.ru](mailto:eleuovaelmira@mail.ru), <https://orcid.org/0000-0002-6488-2714>

**Ерғали Мұстафа Айдарұлы**, «Жаңартылатын энергетиканың заманауи және инновациялық технологиялары» мамандығы бойынша магистрант, Г. Дәукеев атындағы Алматы энергетика және байланыс университеті, «Жаңғыртылатын және баламалы энергия көздері» кафедрасы, Алматы

қ. 050043, Қазақстан Республикасы e-mail: [m.ergali@aes.kz](mailto:m.ergali@aes.kz), <https://orcid.org/0009-0006-7060-5293>

**Ережеп Дархан Есейұлы**, Ә. Бүркітбаев атындағы Энергетика және машина жасау институтының қауымдастырылған профессор, Қ. И. Сәтбаев атындағы ҚазҰТЗУ, Алматы қ., 050013, Қазақстан Республикасы, e-mail: [darhan\\_13@physics.kz](mailto:darhan_13@physics.kz), <https://orcid.org/0000-0002-2232-2911>

**Ершина Айнагуль Капасовна**, физика – математика ғылымдарының докторы, профессор, Физика кафедрасы. Қазақ ұлттық қыздар педагогикалық университеті, Алматы қ., 050040, Қазақстан, e-mail: [123ainakul.yershina@gmail.com](mailto:123ainakul.yershina@gmail.com), <https://orcid.org/0000-0002-6811-3904>

**Жалмағамбетова Ұлтуар**, қауымд. профессоры, "Электротехника және автоматтандыру" кафедрасы, Торайғыров Университет, Павлодар қ., 140000, Қазақстан Республикасы, e-mail: [ultuara@mail.ru](mailto:ultuara@mail.ru), <https://orcid.org/0000-0002-2261-2222>

**Жумадилова Алия Кайрулловна**, техника ғылымдарының кандидаты, қауымд. профессоры, Электр энергетикасы кафедрасы, Энергетика факультеті, Торайғыров университеті, Павлодар қ., 140008, Қазақстан Республикасы, e-mail: [zhumadirova.a@teachers.tou.edu.kz](mailto:zhumadirova.a@teachers.tou.edu.kz), <https://orcid.org/0000-0003-0232-6779> 87079001251

**Жумагулов Михаил Григорьевич**, PhD, қауымд. профессор, доцент. Көлік және энергетика факультеті, «Жылуэнергетика» кафедрасы, Л. Н. Гумилев атындағы Еуразия ұлттық университеті, Астана қ., 010008, Қазақстан Республикасы, e-mail: [zhmg\\_9@mail.ru](mailto:zhmg_9@mail.ru), <https://orcid.org/0000-0002-2702-7292>

**Жұмағұлов Темірбек Жамедұлы**, техника ғылымдарының кандидаты, Қорқыт Ата атындағы Қызылорда университетінің "Инжинирингтік технологиялар" ББ аға оқытушысы, 120000. Қызылорда қ., Қазақстан Республикасы, e-mail: [temur\\_rngm@mail.ru](mailto:temur_rngm@mail.ru), <https://orcid.org/0000-0002-3048-6596>

**Жабағиев Аслан Мұхамедиярұлы**, техника ғылымдарының кандидаты, БББ аға оқытушысы, Қорқыт Ата атындағы Қызылорда университетінің «Инжинирингтік технологиялар» 120000, Қызылорда қ., Қазақстан Республикасы, e-mail: [zhabagiev@korkyt.kz](mailto:zhabagiev@korkyt.kz), <https://orcid.org/0000-0002-7720-0911>

**Жуматова Асель Акановна**, техника ғылымдарының магистрі, аға оқытушы, Қ. И. Сәтбаев атындағы Қазақ ұлттық зерттеу техникалық университеті (ҚазҰТУ), Алматы қ., 050000, Қазақстан Республикасы, e-mail: [a.zhumatova@satbayev.university.kz](mailto:a.zhumatova@satbayev.university.kz), <https://orcid.org/0000-0001-9606-7557>

**Жакипов Нажмитден Берекелиұлы**, «Электрмен жабдықтау» кафедрасының аға оқытушысы, С. Сейфуллин атындағы Қазақ агротехникалық



зерттеу университеті, Астана қ., 010000, Қазақстан Республикасы, e-mail: [nazhmiden@mail.ru](mailto:nazhmiden@mail.ru), <https://orcid.org/0009-0005-7239-2095>

**Зюев Анатолий Михайлович**, техника ғылымдарының докторы, профессор, Орал энергетика институты, Ресейдің тұңғыш президенті атындағы Орал федералдық университеті Б. Н. Ельцин, Екатеринбург қ., 620062, Ресей Федерациясы, e-mail: [a.m.zyuzev@urfu.ru](mailto:a.m.zyuzev@urfu.ru), <https://orcid.org/0000-0002-2233-2730>

**Исабекова Бибігүл Бейсембайқызы**, PhD, қауымд. профессор (доцент), Computer science факультеті, Торайғыров университеті, Павлодар қ., 140008, Қазақстан Республикасы, e-mail: [asbizh@mail.ru](mailto:asbizh@mail.ru), <https://orcid.org/0000-0001-5044-3211>

**Исабеков Жанат Бейсембайұлы**, PhD, қауымд. профессор (доцент), "Электротехника және автоматтандыру" кафедрасы, меңгерушісі Энергетика факультеті, Торайғыров университеті, Павлодар қ., 140008, Қазақстан Республикасы, e-mail: [zh\\_is@mail.ru](mailto:zh_is@mail.ru), <https://orcid.org/0000-0003-3980-1617>

**Ибрагимова Светлана Викторовна**, техника ғылымдарының кандидаты, профессордың ассистенті, Машина жасау, энергетика және ақпараттық технологиялар факультеті, А. Байтұрсынұлы атындағы Қостанай Өңірлік университеті, Қостанай қ., 110000, Қазақстан Республикасы, e-mail: [ibragimovasvetlana75@gmail.com](mailto:ibragimovasvetlana75@gmail.com), <https://orcid.org/0000-0003-2798-9149>

**Икрам Жансері Ақансеріұлы**, «Ақпараттық қауіпсіздік жүйелері» мамандығы бойынша докторант, Ақпараттық Жүйелер факультеті, әл-Фараби атындағы ҚазҰУ, Алматы қ., 050010, Қазақстан Республикасы, e-mail: [zhanserikz@gmail.com](mailto:zhanserikz@gmail.com), <https://orcid.org/0009-0001-8059-6590>

**Исатаев Мұхтар Советұлы**, физика – математика ғылымдарының кандидаты, қауымд. профессор, әл-Фараби атындағы ҚазҰУ. Физика-техникалық факультеті, Жылу физикасы және техникалық физика кафедрасы. Алматы қ., 050040, Қазақстан Республикасы, e-mail: [muhtar.isataev@kaznu.kz](mailto:muhtar.isataev@kaznu.kz), <https://orcid.org/0000-0001-8248-670X>

**Қалы Нұрболат Асқарұлы**, «Автоматтандыру және басқару» мамандығы бойынша магистрант, Энергетика факультеті, Торайғыров университеті, Павлодар қ., 140008, Қазақстан Республикасы, e-mail: [vergaliyev10@gmail.com](mailto:vergaliyev10@gmail.com), <https://orcid.org/0009-0001-1315-2615>

**Кислов Александр**, профессор "Электротехника және автоматтандыру" кафедрасы, Торайғыров университеті, Павлодар қ., 140000, Қазақстан Республикасы, e-mail: [kislovpsu@mail.ru](mailto:kislovpsu@mail.ru), <https://orcid.org/0000-0003-4816-8008>

**Крыкбаева Мариям**, Торайғыров университеті, Павлодар қ., 140008, Қазақстан Республикасы, e-mail: [mgn017@mail.ru](mailto:mgn017@mail.ru), <https://orcid.org/0009-0001-0770-5164>

**Кенбай Алишер**, Асылбекулы, физика-техникалық факультетінің докторанты, әл-Фараби атындағы ҚазҰУ, Алматы, 050040, Қазақстан Республикасы, e-mail: [a.kenbay@satbayev.university](mailto:a.kenbay@satbayev.university), <https://orcid.org/0000-0001-6803-5873>

**Куликов Анатолий Петрович**, Жүйелік сәулетші, «С-NRG» (Синерджи) ЖШС, Алматы, 050051, Қазақстан Республикасы, e-mail: [anatoliy.kulikov1990@gmail.com](mailto:anatoliy.kulikov1990@gmail.com), <https://orcid.org/0009-0007-3908-8432>

**Каверин Владимир Викторович**, техника ғылымдарының кандидаты, доцент, Энергетика, автоматика және теле байланыс факультеті, Әбілқас Сағынов атындағы Қарағанды техникалық университеті, Қарағанды қ. 100012, Қазақстан Республикасы, e-mail: [kaverinkz@inbox.ru](mailto:kaverinkz@inbox.ru), <https://orcid.org/0000-0003-2021-7445>

**Кожаметова Динара Ошановна**, PhD, IT технологиялар кафедрасы, қауымд. профессоры, Шәкәрім университеті, Семей қ., 071412, Қазақстан Республикасы, e-mail: [dinara\\_kozhahmet@mail.ru](mailto:dinara_kozhahmet@mail.ru), <https://orcid.org/0000-0002-4327-3899>

**Кошкин Игорь Владимирович**, техника ғылымдарының кандидаты, «Электр энергетикасы» кафедрасы А. Байтұрсынұлы атындағы Қостанай өңірлік университеті, Қостанай қ., 110000, Қазақстан Республикасы, e-mail: [elektroenergetika@mail.ru](mailto:elektroenergetika@mail.ru), <https://orcid.org/0000-0003-3818-3781>

**Кинжибекова Акмарал Кабиденовна**, техника ғылымдарының кандидаты, «Жылуэнергетика» кафедрасының доценті, Торайғыров университеті, Павлодар қ., 140008, Қазақстан Республикасы, e-mail: [akmaral70@mail.ru](mailto:akmaral70@mail.ru), <https://orcid.org/0000-0001-5839-3001>

**Карманов Амангельды Ерболович**, PhD, «Жылуэнергетика» кафедрасының меңгерушісі, Торайғыров университеті, Павлодар қ., 140008, Қазақстан Республикасы, e-mail: [aman270685@mail.ru](mailto:aman270685@mail.ru), <https://orcid.org/0000-0001-7512-0275>

**Калтаев Абдулла Габдылманұлы**, PhD, қауымд. профессор (доцент), Торайғыров университеті, Павлодар қ., 140008, Қазақстан Республикасы, e-mail: [abdulla911@mail.ru](mailto:abdulla911@mail.ru), <https://orcid.org/0000-0003-1684-3347>

**Калимулдина Гүлнур Серикқызы**, PhD, ассистент профессор, Назарбаев университет, Астана қ. 010000, Қазақстан республикасы, e-mail: [gkalimuldina@nu.edu.kz](mailto:gkalimuldina@nu.edu.kz), <https://orcid.org/0000-0001-9185-3217>

**Құлтан Исламбек Берікұлы**, техника ғылымдарының магистрі, Қорқыт Ата атындағы Қызылорда университеті, Инженерлі-технологиялық институты, Қызылорда қ., 020000, Қазақстан Республикасы, e-mail: [islamбек.kultan@mail.ru](mailto:islamбек.kultan@mail.ru), <https://orcid.org/0000-0001-9485-0425>

**Колесников Евгений Николаевич**, PhD, «Электротехника және автоматтандыру» кафедрасының постдокторанты, Торайғыров университеті,

Павлодар қ.140000, Қазақстан Республикасы, e-mail [jeka89\\_pvl@mail.ru](mailto:jeka89_pvl@mail.ru), <https://orcid.org/0000-0002-2334-5146>

**Мустагулова Бопа Жанабаевна**, Аға оқытушы, Ф. Дәукеев атындағы Алматы энергетика және байланыс университеті, «Жаңғыртылатын және баламалы энергия көздері» кафедрасы, Алматы қ.050013, Қазақстан Республикасы e-mail: [b.mustagulova@aes.kz](mailto:b.mustagulova@aes.kz), <https://orcid.org/0009-0006-7060-5293>.

**Мехтиев Али Джаванширович**, техника ғылымдарының кандидаты, қауымд. профессор, "Электр жабдықтарын пайдалану" кафедрасы, аға оқытушысы, С.Сейфуллин атындағы Қазақ агротехникалық зерттеу университеті, г. Астана, 010011, Қазақстан Республикасы, e-mail: [a.mekhtiyev@kazatu.edu.kz](mailto:a.mekhtiyev@kazatu.edu.kz), <https://orcid.org/0000-0002-2633-3976>

**Марковский Вадим Павлович**, техника ғылымдарының кандидаты, «Электрэнергетика» кафедрасы, профессоры, Торайғыров университеті, Павлодар қ., 140008, Қазақстан Республикасы, e-mail: [wadim54@mail.ru](mailto:wadim54@mail.ru), <https://orcid.org/0000-0002-8519-7679>

**Меирбекова Оксана Даировна**, аға оқытушы, Қожа Ақмет Ясауи атындағы Халықаралық қазақ-түрік университеті, Түркістан қ., 161200, Қазақстан Республикасы, e-mail: [oksana\\_120183@mail.ru](mailto:oksana_120183@mail.ru), <https://orcid.org/0000-00030949-1443>

**Манатбаев Рүстем Құсайынғазыұлы**, техника ғылымдарының кандидаты, қауымд. профессор, әл-Фараби атындағы ҚазҰУ. Физика-техникалық факультеті, Жылу физикасы және техникалық физика кафедрасы. Алматы қ., 050040, Қазақстан Республикасы, e-mail: [rustemmanatbayev@gmail.com](mailto:rustemmanatbayev@gmail.com), <https://orcid.org/0000-0003-2151-2606>

**Мұхамбетжан Айсұлу Мұхамбетжанқызы**, Физика-математика ғылымдарының кандидаты, Қызылорда ашық университетінің бөлім басшысы, Қазақстан Республикасы, Қызылорда қ. 120016, e-mail: [aisulumuhankyzy@mail.ru](mailto:aisulumuhankyzy@mail.ru), <https://orcid.org/0000-0003-0799-6229>

**Мубарак Асем**, Ассистент зерттеуші, ғылым магистрі, Назарбаев университет, Астана қ. 010000, Қазақстан республикасы, e-mail: [Assem.mubarak@nu.edu.kz](mailto:Assem.mubarak@nu.edu.kz), <https://orcid.org/0009-0003-3126-5378>

**Нефтисов Александр**, PhD, қауымд. профессор, "Industry 4.0" ғылыми-инновациялық орталығының директоры, Astana IT University, Астана қ. Қазақстан, 010000, e-mail: [alexandr.neftissov@astanait.edu.kz](mailto:alexandr.neftissov@astanait.edu.kz), <https://orcid.org/0000-0003-4079-2025>

**Назаров Есенжол Асылбекұлы**, техника ғылымдарының кандидаты, Қорқыт Ата атындағы Қызылорда университеті, "Биология, география және химия" ББ аға оқытушысы, 120000. Қызылорда қ., Қазақстан Республикасы, e-mail: [Nazarov197514@mail.ru](mailto:Nazarov197514@mail.ru), <https://orcid.org/0000-0003-2368-6466>

**Неберекутина Наталия Сергеевна**, техника ғылымдарының кандидаты, оқытушы, МАКБМ Челябині облысының политехникалық колледжі, Магнитогорск қ. 455045, Ресей Федерациясы, e-mail: [natalia.73@mail.ru](mailto:natalia.73@mail.ru), <https://orcid.org/0009-0004-8098-9820>

**Новожилов Александр Николаевич**, техника ғылымдарының докторы, профессор, Электр энергетикасы кафедрасы Торайғыров университеті, Павлодар қ., 140008, Қазақстан Республикасы, e-mail: [novozhilova\\_on@mail.ru](mailto:novozhilova_on@mail.ru), <https://orcid.org/0000-0001-7530-5034>

**Новожилов Тимофей Александрович**, техника ғылымдарының кандидаты, доцент, Өнеркәсіптік кәсіпорындарды электрмен жабдықтау кафедрасы, Омбы мемлекеттік техникалық университеті, Омбы қ., 644050, Ресей Федерациясы, e-mail: [timokvey@mail.ru](mailto:timokvey@mail.ru), <https://orcid.org/0000-0003-0293-7852>

**Никифоров Александр Степанович**, техника ғылымдарының докторы, профессоры, «Жылуэнергетика» кафедрасы, Торайғыров университеті, коммерциялық емес акционерлік қоғамы, Павлодар қ., 140008, Қазақстан Республикасы, e-mail: [aleke4599@mail.ru](mailto:aleke4599@mail.ru), <https://orcid.org/0000-0002-6977-0957>

**Олжабаева Қарлығаш Серікқызы**, PhD, Ф. Дәукеев атындағы Алматы энергетика және байланыс университеті, «Жылу Энергетикалық қондырғылар» кафедрасы, Алматы қ. 050013, Қазақстан Республикасы, e-mail: [k.olzhabayeva@aes.kz](mailto:k.olzhabayeva@aes.kz), <https://orcid.org/0000-0002-2018-8835>

**Оспанов Ербол Амангазович**, PhD, IT технологиялар кафедрасының қауымдастырылған профессоры, Шәкәрім университеті, Семей қ., 071412, Қазақстан Республикасы, e-mail: [y.ospanov@shakarim.kz](mailto:y.ospanov@shakarim.kz), <https://orcid.org/0000-0001-5342-274X>

**Омаров Батырхан Султанович**, PhD, қауымд. профессор, Компьютерлік технологиялар және киберқауіпсіздік факультеті, Халықаралық ақпараттық технологиялар университеті, Алматы қ., 050010, Қазақстан Республикасы, e-mail: [batyahan@gmail.com](mailto:batyahan@gmail.com), <https://orcid.org/0000-0002-8341-7113>

**Онгар Булбул**, PhD, қауымд. профессор, Қ. И.Сәтбаев атындағы Қазақ ұлттық зерттеу техникалық университеті (ҚазҰТУ), Алматы қ., 050013, Қазақстан Республикасы, e-mail: [b.ongar@satbayev.university](mailto:b.ongar@satbayev.university), <https://orcid.org/0000-0002-8333-8343>

**Өмірбаева Айжан Өмірбайқызы**, «Жылуэнергетика» Білім беру бағдарламасы бойынша докторант, Көлік-энергетика факультеті, Л. Н.Гумилев атындағы Еуразия ұлттық университеті, Астана қ, 010008, Қазақстан Республикасы, e-mail: [a.omerbaeva@mail.ru](mailto:a.omerbaeva@mail.ru), <https://orcid.org/0000-0001-5008-5135>

**Пушкарев Сергей Дмитриевич**, магистрі, аға оқытушысы, А. Байтұрсынұлы атындағы Қостанай өңірлік университеті, «Электр

энергетикасы» кафедрасы, Қостанай қ., 110000, Қазақстан Республикасы, e-mail: [Medpromexport@mail.ru](mailto:Medpromexport@mail.ru), <https://orcid.org/0009-0003-2888-2228>

**Приходько Евгений Валентинович**, техника ғылымдарының кандидаты, профессор, «Жылуэнергетика» кафедрасы, «Торайғыров университеті» коммерциялық емес акционерлік қоғамы, Павлодар қ., 140008, Қазақстан Республикасы, e-mail: [john1380@mail.ru](mailto:john1380@mail.ru), <https://orcid.org/0000-0003-2168-2285>

**Потапенко Александра Олеговна**, PhD, Торайғыров Университет, 140007, Қазақстан Республикасы, Павлодар қ., e-mail: [alxopt@gmail.com](mailto:alxopt@gmail.com), <https://orcid.org/0000-0002-9523-5333>

**Расмухаметова Айнур Серікқызы**, PhD, ассоц.профессор, Ғ. Дәукеев атындағы Алматы энергетика және байланыс университеті, «Жаңғыртылатын және баламалы энергия көздері» кафедрасы, Алматы қ. 050013, Қазақстан Республикасы, e-mail: [a.rasmukhametova@aes.kz](mailto:a.rasmukhametova@aes.kz), <https://orcid.org/0000-0003-1376-6112>

**Рустамов Насим Тулегенович**, техника ғылымдарының докторы, аға оқытушы, Қожа Ақмет Ясауи атындағы Халықаралық қазақ-түрік университеті, Түркістан қ., 161200, Қазақстан Республикасы, e-mail: [nasim52@mail.ru](mailto:nasim52@mail.ru), <https://orcid.org/0000-00030949-1443>

**Рахимбердинова Дилара Муратовна**, PhD, қауым. профессор «Электротехника және автоматтандыру» кафедрасы, Торайғыров университеті, Павлодар қ.140000, Қазақстан Республикасы, e-mail: [dil\\_lara83@mail.ru](mailto:dil_lara83@mail.ru), <https://orcid.org/0000-0002-2985-9498>

**Смайлов Нуржигит Куралбаевич**, PhD, қауымд. профессор, Электроника, телекоммуникациялар және ғарыштық технологиялар кафедрасы, Автоматтандыру және ақпараттық технологиялар институты, Алматы, 050010, Қазақстан Республикасы, e-mail: [n.smailov@satbayev.university](mailto:n.smailov@satbayev.university), <https://orcid.org/0000-0002-7264-2390>

**Сарсикеев Ермек Жасланқұлы**, техникалық ғылымдар кандидаты, философия докторы, Электр жабдықтарын пайдалану кафедрасы, меңгерушісі, С.Сейфуллин атындағы Қазақ агротехникалық зерттеу университеті, г. Астана, 010011, Қазақстан Республикасы, e-mail: [sarsikeev.ermek@yandex.ru](mailto:sarsikeev.ermek@yandex.ru), <https://orcid.org/0000-0002-7209-5024>

**Сагинов Ғылым Арғынович**, Автоматтандыру және басқару мамандығы бойынша магистрант, Энергетика факультеті, Торайғыров университеті, Павлодар қ., 140008, Қазақстан Республикасы, e-mail: [yergaliyev10@gmail.com](mailto:yergaliyev10@gmail.com), <https://orcid.org/0009-0005-0567-7189>

**Сарсенбаева Гаухар Асановна**, Магистр, машина жасау, энергетика және ақпараттық технологиялар факультеті, А. Байтұрсынұлы атындағы

Қостанай Өңірлік университеті, Қостанай қ., 110000, Қазақстан Республикасы, e-mail: [s.gaukhar1982@gmail.com](mailto:s.gaukhar1982@gmail.com), <https://orcid.org/0009-0002-2571-4176>

**Сарсембаев Баянды Қазыбекұлы**, PhD, қауымд. профессор, Astana IT University, Астана қ., 010000, Қазақстан республикасы, e-mail: [bayandy.sarsembayev@astanait.edu.kz](mailto:bayandy.sarsembayev@astanait.edu.kz), <https://orcid.org/0000-0002-1087-4436>

**Сыдыкова Гүлнар Құдайбергенова**, техника ғылымдарының кандидаты, қауымд. профессор, Қорқыт Ата атындағы Қызылорда университеті, Инженерлі-технологиялық институты, Қызылорда қ., 020000, Қазақстан Республикасы, e-mail: [sydykova77@mail.ru](mailto:sydykova77@mail.ru), <https://orcid.org/0000-0002-6841-028X>

**Сағындық Әйгерім Бекенқызы**, PhD, постдокторант Торайғыров Университеті, Энергетика факультеті, Павлодар қ., 140008, Қазақстан Республикасы, e-mail: [aiko\\_90@mail.ru](mailto:aiko_90@mail.ru), <https://orcid.org/0000-0003-0376-2150>

**Талипов Олжас Манарбекұлы**, PhD, профессор, «Электротехника және автоматтандыру» кафедрасы, меңгерушісі, Энергетика факультеті, Торайғыров университеті, Павлодар қ., 140008, Қазақстан Республикасы, e-mail: [talipov1980@mail.ru](mailto:talipov1980@mail.ru), <https://orcid.org/0000-0002-8355-1769>

**Таңжарықов Панабек Абсатұлы**, техника ғылымдарының кандидаты, Қорқыт Ата атындағы Қызылорда университетінің "Инжинирингтік технологиялар" ББ профессоры, 120000. Қызылорда қ., Қазақстан Республикасы, e-mail: [pan\\_19600214@mail.ru](mailto:pan_19600214@mail.ru), <https://orcid.org/0000-0002-6490-9972>

**Тайманов Смайыл Тамшыбаевич**, техника ғылымдарының кандидаты, «Электр энергетикасы, техносфералық қауіпсіздік және экология» кафедрасы, аға оқытушысы, Қорқыт ата атындағы Қызылорда университеті, Қазақстан Республикасы, Қызылорда қ. 120014, e-mail: [smaiyl\\_taimanov@mail.ru](mailto:smaiyl_taimanov@mail.ru), <https://orcid.org/0000-0001-5375-1180>

**Утеғұлов Арман Болатбекұлы**, техника ғылымдарының кандидаты, қауымд. профессор, «Электр энергетикасы» кафедрасы, Л. Н.Гумилев атындағы Еуразия ұлттық университеті, Астана қ., 010011, Қазақстан Республикасы, e-mail: [utegulov76@mail.ru](mailto:utegulov76@mail.ru), <https://orcid.org/0000-0001-8637-3665>

**Успанова Анастасия Игоревна**, магистрі, аға оқытушысы, математика және физика кафедрасы, А. Байтұрсынұлы атындағы Қостанай өңірлік университеті, Қостанай қ., 110000, Қазақстан Республикасы, e-mail: [Kamorrasweet1@gmail.com](mailto:Kamorrasweet1@gmail.com), <https://orcid.org/0000-0002-3484-8750>

**Шукаманов Жанибек Ерикович**, «Автоматтандыру және телекоммуникация» кафедрасы, аға оқытушысы, Технологиялық факультет, М. Х. Дулати атындағы Тараз өңірлік университеті, Тараз қ., 080000, Қазақстан Республикасы, e-mail: <https://orcid.org/0000-0003-3017-7133>, [zhe.shukamanov@dulaty.kz](mailto:zhe.shukamanov@dulaty.kz)

**Шимпф Алексей**, зертхана меңгерушісі "Электротехника және автоматтандыру" кафедрасы, Павлодар қ., 140000, Қазақстан Республикасы, e-mail: [shimpf5329@gmail.com](mailto:shimpf5329@gmail.com), <https://orcid.org/0000-0003-4203-9117>

**Шандронов Дмитрий Николаевич**, оқытушы, Радиоэлектроника және байланыс әскери-инженерлік институты, Алматы қ., 050010 Қазақстан Республикасы, e-mail: [shan\\_dima@mail.ru](mailto:shan_dima@mail.ru), <https://orcid.org/0000-0002-3016-0027>

**Шерязов Сакен, Койшыбаевич**, техника ғылымдарының докторы, профессор, «Энергоқамтамасыз ету және технологиялық процестерді автоматтандыру» кафедрасы, профессоры, Ресей Федерациясы, Челябинск қ., 454003, Л. Н. Гумилев атындағы Еуразия ұлттық университеті, «Электроэнергетика» кафедрасы, профессор, Қазақстан Республикасы, Астана қ., 010009, e-mail: [sakenu@yandex.ru](mailto:sakenu@yandex.ru), <https://orcid.org/0000-0001-8795-5114>

**Шоланов Қорғанбай Сагнаевич**, техникалық ғылымдардың докторы, профессор, С. Сейфуллин атындағы Қазақ агротехникалық зерттеу университеті, Астана қ., 010000, Қазақстан Республикасы, e-mail: [sholkor@gmail.ru](mailto:sholkor@gmail.ru), <https://orcid.org/0000-0002-2077-7883>

## СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ

**Ауезханов Дархан Азаматович**, докторант, специальность «Автоматизация и управление», энергетический факультет, «Казахский агротехнический исследовательский университет имени С. Сейфуллина», Астана қ., 010011, Республика Казахстан, e-mail: [dauyezkhhanov@gmail.com](mailto:dauyezkhhanov@gmail.com), <https://orcid.org/0009-0006-4164-1033>,

**Акаев Айбек Муратбекович**, PhD, Школа архитектуры, строительства и энергетики, Восточно-Казахстанский технический университет имени Д. Серикбаева, г. Усть-Каменогорск, 070000, Республика Казахстан, e-mail: [aybek.akaev.vko\\_81@mail.ru](mailto:aybek.akaev.vko_81@mail.ru), <https://orcid.org/0000-0001-9390-5703>

**Арипова Назгуль Михайловна**, докторант, кафедра «Теплоэнергетика» Торайғыров университет, г. Павлодар, 140003, Республика Казахстан, e-mail: [nazgul\\_2010@mail.ru](mailto:nazgul_2010@mail.ru), <https://orcid.org/0000-0003-2760-8617>

**Алдияров Абдурахман Уалиевич**, и.о. профессора кафедра физико-технического факультета, КазНУ имени аль-Фараби, г. Алматы, 050040, Республика Казахстан, e-mail: [abdurakhman.aldiyarov@kaznu.kz](mailto:abdurakhman.aldiyarov@kaznu.kz), <https://orcid.org/0000-0002-5091-7699>

**Анарбаев Алибек Ерсайнович**, ст. преподаватель, Факультет энергетики, Торайғыров университет, г. Павлодар, 140008, Республика Казахстан, e-mail: [alibek\\_anarbaev@mail.ru](mailto:alibek_anarbaev@mail.ru), <https://orcid.org/0000-0001-6890-8005>

**Ауесхан Акниет Алмасханқызы**, Магистрант кафедры «Электроэнергетика», Евразийского национального исследовательского университета имени Л. Н. Гумилева, Республика Казахстан, г. Астана, Индекс: 010009, Республика Казахстан, e-mail: [a.aueskhan@inbox.ru](mailto:a.aueskhan@inbox.ru), <https://orcid.org/0009-0001-1591-6789>

**Аринова Анар**, Ассистент исследователя, магистр наук, Назарбаев университет, г. Астана, 010000, Республика Казахстан, e-mail: [Anar.arinova@nu.edu.kz](mailto:Anar.arinova@nu.edu.kz), <https://orcid.org/0000-0002-7780-4555>,

**Акбаров Дилмурод**, докторант, Кафедра электротехнологии и применения электро оборудования, Ташкентского института инженеров ирригации и механизации сельского хозяйства, 100000 г. Ташкент, Республика Узбекистан, e-mail: [dakbarov@umail.uz](mailto:dakbarov@umail.uz), <https://orcid.org/0000-0002-8689-0619>

**Айтуганова Айша Менлибаевна**, магистр педагогических наук, Кызылординский университет имени Коркыт Ата, Инженерно-технологический институт, Кызылорда, 020000, Республики Казахстан, e-mail: [mag\\_zhan97@mail.ru](mailto:mag_zhan97@mail.ru), <https://orcid.org/0000-0002-8141-5157>

**Асаинов Гибрат Жоламанович**, PhD, ст. преподаватель, кафедра «Электроснабжение» Казахский агротехнический исследовательский

университет им. С. Сейфуллина, Астана, 010000, Республика Казахстан, e-mail: [asainovgibrat@gmail.com](mailto:asainovgibrat@gmail.com), <https://orcid.org/0000-0002-1330-5909>

**Баденова Жанар Рамазановна**, докторант, специальность «Теплоэнергетика», Школа архитектуры, строительства и энергетики, Восточно-Казахстанский технический университет имени Д.Серикбаева, г. Усть-Каменогорск, 070000, Республика Казахстан, e-mail: [janara1993m@mail.ru](mailto:janara1993m@mail.ru), <https://orcid.org/0009-0002-7326-1714>

**Бондарцев Давид Юрьевич**, PhD, профессор АУЭС, ассоц. профессор ВАК, Алматинский Университет Энергетики и Связи имени Г. Даукеева, Институт энергетики и зеленых технологий, г. Алматы, 050013, Республика Казахстан, e-mail: [d.bondartsev@aues.kz](mailto:d.bondartsev@aues.kz), <https://orcid.org/0000-0001-8778-7851>

**Байсеитов Гани Нуралиевич**, кандидат технических наук, Научно-исследовательский центр «Казахстан Инжиниринг» LLP, г. Астана, 010000, Республика Казахстан, e-mail: [baiseitov1970@mail.ru](mailto:baiseitov1970@mail.ru), ID: <https://orcid.org/0009-0001-0154-0071>

**Баянбаев Кайрат Амангельдинович**, магистр-инженер, Казахский национальный исследовательский технический университет имени К. И. Сатпаева (КазННТУ), г. Алматы, 050013, Республика Казахстан, e-mail: [k.bayanbayev@satbayev.university](mailto:k.bayanbayev@satbayev.university), <https://orcid.org/0000-0001-9635-0424>

**Бабахан Шохрух Абдилкасымович**, ст. преподаватель, Международный казахско-турецкий университет имени Хожди Ахмеда Ясави, г. Туркестан, 161200, Республика Казахстан, e-mail: [babakhan.shokhrukh@ayu.edu.kz](mailto:babakhan.shokhrukh@ayu.edu.kz), <https://orcid.org/0000-0002-7723-0045>

**Бергузин Асхат Нурланович**, PhD, профессор, Торайғыров университет, г. Павлодар, 140008, Республика Казахстан, e-mail: [askhat\\_berguzinov@mail.ru](mailto:askhat_berguzinov@mail.ru) <https://orcid.org/0000-0001-6954-8259>

**Генбач Александр Алексеевич**, доктор технических наук, профессор ВАК, Алматинский Университет Энергетики и Связи имени Г. Даукеева, Институт энергетики и зеленых технологий, г. Алматы, 050013, Республика Казахстан, e-mail: [a.genbach@aues.kz](mailto:a.genbach@aues.kz), <https://orcid.org/0009-0001-3819-4387>

**Джаналиев Балатай Муратович**, магистр, кафедра «Автоматизация, телекоммуникации и управление», Южно-Казахстанский университет имени М.Ауэзова, г.Шымкент, 160001, Республика Казахстан, e-mail: [balatai86.22@mail.ru](mailto:balatai86.22@mail.ru), <https://orcid.org/0009-0000-1474-5423>

**Дружинин Валерий Михайлович**, PhD, ст. преподаватель, кафедра Энергетика, Карагандинский индустриальный университет, г. Темиртау, 101400, Республика Казахстан, e-mail: [druzhinin\\_vm@mail.ru](mailto:druzhinin_vm@mail.ru), <https://orcid.org/0000-0001-7261-8780>

**Дуйсенбек Жансая Сериковна**, PhD, ассистент профессор, кафедра Экологии и менеджмент в инженерии, Алматинский университет энергетики и связи имени Гумарбека Даукеева, Алматы, 050013, Республика Казахстан, e-mail: [zhaniko.adina@mail.ru](mailto:zhaniko.adina@mail.ru), <https://orcid.org/0000-0001-7844-4240>

**Додаев Султан**, магистр, КазНУ им. аль-Фараби. Физико-технический факультет. Кафедра теплофизики и технической физики, г. Алматы, 050040, Республика Казахстан, e-mail: [dodaev230199@gmail.com](mailto:dodaev230199@gmail.com), <https://orcid.org/0009-0006-0357-4618>

**Ердыбаева Назгуль Кадырбековна**, доктор физико-математических наук, Школа архитектуры, строительства и энергетики, Восточно-Казахстанский технический университет имени Д. Серикбаева, Усть-Каменогорск, 070000, Республика Казахстан, e-mail: [nyerdybayeva@mail.ru](mailto:nyerdybayeva@mail.ru), <https://orcid.org/0000-0003-0314-0503>

**Есмаханова Лаура Нурлановна**, PhD, кафедра «Автоматизация и телекоммуникация» Технологический факультет, Таразский региональный университет имени М.Х. Дулати, г. Тараз, 080000, Республика Казахстан, e-mail: [laura060780@mail.ru](mailto:laura060780@mail.ru), <https://orcid.org/0000-0002-3308-9676>

**Елеуова Эльмира Шораевна**, кандидат сельскохозяйственных наук, ст. преподаватель ОП «Водное хозяйство и землеустройство» Кызылординского университета имени Коргыт Ата, 120000, г. Кызылорда, Республика Казахстан, e-mail: [eleuovaelmira@mail.ru](mailto:eleuovaelmira@mail.ru), <https://orcid.org/0000-0002-6488-2714>

**Ергали Мустафа Айдарулы**, магистрант, специальность «Современные инновационные технологии возобновляемой энергетики», «Алматинский университет энергетики и связи имени Г. Даукеева, Кафедра «Возобновляемых и альтернативных источников энергии», г. Алматы, 050043, Республика Казахстан, e-mail: [m.ergali@aues.kz](mailto:m.ergali@aues.kz), <https://orcid.org/0009-0006-7060-5293>

**Ережеп Дархан Есейұлы**, ассоц. профессор института Энергетики и машиностроения имени А. Буркитбаева, КазННТУ имени К. И. Сатпаева, г. Алматы, 050013, Республика Казахстан, e-mail: [darhan\\_13@physics.kz](mailto:darhan_13@physics.kz), <https://orcid.org/0000-0002-2232-2911>

**Ершина Айнагуль Капасовна**, д.ф.-м. н., профессор, Казахский Национальный Женский Педагогический Университет, Кафедра физики. Алматы, 050040, Казахстан, e-mail: [123ainakul.yershina@gmail.com](mailto:123ainakul.yershina@gmail.com), <https://orcid.org/0000-0002-6811-3904>

**Жалмагамбетова Ултуар**, ассоц профессор кафедра «электротехники и автоматизации», Торайғыров Университет, г. Павлодар, 140000, Республика Казахстан, e-mail: [ultuara@mail.ru](mailto:ultuara@mail.ru), <https://orcid.org/0000-0002-2261-2222>

**Жумадилова Алия Кайрулловна**, кандидат технических наук, ассоц. профессор кафедра Электроэнергетика, Факультет энергетики,

Торайғыров университет, г. Павлодар, 140008, Республика Казахстан, e-mail: [zhumadirova.a@teachers.tou.edu.kz](mailto:zhumadirova.a@teachers.tou.edu.kz), <https://orcid.org/0000-0003-0232-6779>

**Жумагулов Михаил Григорьевич**, PhD, ассоц. профессор, доцент. Факультет «Транспортно-энергетический», кафедра «Теплоэнергетика», Евразийский национальный университет имени Л. Н. Гумилева, г. Астана, 01008, Республика Казахстан, e-mail: [zhmg\\_9@mail.ru](mailto:zhmg_9@mail.ru), <https://orcid.org/0000-0002-2702-7292>

**Жумагулов Темирбек Жамедович**, кандидат технических наук, ст. преподаватель ОП «Инжиниринговые технологии» Кызылординского университета имени Коркыт Ата, 120000. г. Кызылорда, Республика Казахстан, e-mail: [temur\\_rngm@mail.ru](mailto:temur_rngm@mail.ru), <https://orcid.org/0000-0002-3048-6596>

**Жабалиев Аслан Мухамедиярович**, кандидат технических наук, старший преподаватель ОП «Инжиниринговые технологии» Кызылординского университета имени Коркыт Ата, 120000, г. Кызылорда, Республика Казахстан, e-mail: [zhabagiev@korkyt.kz](mailto:zhabagiev@korkyt.kz), <https://orcid.org/0000-0002-7720-0911>

**Жуматова Асель Акановна**, магистр технических наук, ст. преподаватель, Казахский национальный исследовательский технический университет имени К. И. Сатпаева (КазННТУ), г. Алматы, 050000, Республика Казахстан, e-mail: [a.zhumatova@satbayev.university.kz](mailto:a.zhumatova@satbayev.university.kz), <https://orcid.org/0000-0001-9606-7557>

**Жакипов Нажмитден Берекелиулы**, ст. преподаватель, кафедра «Электроснабжение», Казахский агротехнический исследовательский университет имени С. Сейфуллина, г. Астана, 010000, Республика Казахстан, e-mail: [nazhmiden@mail.ru](mailto:nazhmiden@mail.ru), <https://orcid.org/0009-0005-7239-2095>

**Зюев Анатолий Михайлович**, доктор технических наук, профессор, Уральский энергетический институт, Уральский Федеральный Университет имени первого Президента России Б. Н. Ельцина, г. Екатеринбург, 620062, Российская Федерация, e-mail: [a.m.zyuzev@urfu.ru](mailto:a.m.zyuzev@urfu.ru), <https://orcid.org/0000-0002-2233-2730>

**Исабекова Бибигуль Бейсембаевна**, PhD, ассоц. профессор (доцент), Факультет Computer science, Торайғыров университет, г. Павлодар, 140008, Республика Казахстан, e-mail: [asbizz@mail.ru](mailto:asbizz@mail.ru), <https://orcid.org/0000-0001-5044-3211>

**Исабеков Жанат Бейсембайевич**, PhD, ассоц. профессор (доцент), зав. кафедрой «Электротехники и Автоматизации» Факультета энергетики, Торайғыров университет, г. Павлодар, 140008, Республика Казахстан, e-mail: [zh\\_is@mail.ru](mailto:zh_is@mail.ru) <https://orcid.org/0000-0003-3980-1617>

**Ибрагимова Светлана Викторовна**, кандидат технических наук, ассистент профессора, Факультет машиностроения, энергетики и информационных технологий, Костанайский региональный университет

имени А. Байтұрсынұлы, г. Костанай, 110000, Республика Казахстан, e-mail: [ibragimovasvetlana75@gmail.com](mailto:ibragimovasvetlana75@gmail.com), <https://orcid.org/0000-0003-2798-9149>

**Икрам Жансери Акансериулы**, докторант по специальности «Системы информационной безопасности», Факультет Информационных Систем, КазНУ имени аль-Фараби, г. Алматы, 050010, Республика Казахстан, e-mail: [zhanserikz@gmail.com](mailto:zhanserikz@gmail.com), <https://orcid.org/0009-0001-8059-6590>

**Исатаев Мухтар Советович**, кандидат физико-математических наук, ассоц. профессор, КазНУ имени аль-Фараби. Физико-технический факультет. Кафедра теплофизики и технической физики, г. Алматы, 050040, Республика Казахстан, e-mail: [muhtar.isataev@kaznu.kz](mailto:muhtar.isataev@kaznu.kz), <https://orcid.org/0000-0001-8248-670X>

**Калы Нұрболат Асқарұлы**, магистрант, специальность «Автоматизация и управление», Факультет энергетики, Торайғыров университет, г. Павлодар, 140008, Республика Казахстан, e-mail: [vergaliev10@gmail.com](mailto:vergaliev10@gmail.com), <https://orcid.org/0009-0001-1315-2615>

**Кислов Александр**, профессор кафедра «Электротехника и автоматизация», Торайғыров Университет, г. Павлодар, 140000, Республика Казахстан, e-mail: [kislovpsu@mail.ru](mailto:kislovpsu@mail.ru), <https://orcid.org/0000-0003-4816-8008>

**Крыкбаева Мариям**, Торайғыров Университет г. Павлодар, 140008, Республика Казахстан, e-mail: [mgn017@mail.ru](mailto:mgn017@mail.ru), <https://orcid.org/0009-0001-0770-5164>

**Кенбай Алишер Асылбекулы**, докторант, кафедра физико-технического факультета, КазНУ имени аль-Фараби, г. Алматы, 050040, Республика Казахстан, e-mail: [a.kenbay@satbayev.university](mailto:a.kenbay@satbayev.university), <https://orcid.org/0000-0001-6803-5873>

**Куликов Анатолий Петрович**, Системный архитектор, ТОО «С-NRG» (Синерджи), г. Алматы, 050051, Республика Казахстан, e-mail: [anatoliy.kulikov1990@gmail.com](mailto:anatoliy.kulikov1990@gmail.com), <https://orcid.org/0009-0007-3908-8432>

**Каверин Владимир Викторович**, кандидат технических наук, доцент, Факультет энергетики, автоматики и телекоммуникаций, Карагандинский технический университет имени А. Сагинова, Караганда, 100012, Республика Казахстан, e-mail: [kaverinkz@inbox.ru](mailto:kaverinkz@inbox.ru), <https://orcid.org/0000-0003-2021-7445>

**Кожаметова Динара Ошановна**, PhD, ассоц. профессор кафедры IT технологий, Шакарим университет, г. Семей, 071412, Республика Казахстан, e-mail: [dinara\\_kozhahmet@mail.ru](mailto:dinara_kozhahmet@mail.ru), <https://orcid.org/0000-0002-4327-3899>

**Кошкин Игорь Владимирович**, кандидат технических наук, кафедра «Электроэнергетика» Костанайский региональный университет имени А. Байтұрсынұлы, г. Костанай, 110000, Республика Казахстан, e-mail: [elektroenergetika@mail.ru](mailto:elektroenergetika@mail.ru), <https://orcid.org/0000-0003-3818-3781>

**Кинжибекова Акмарал Кабиденовна**, кандидат технических наук, ассоциированный профессор кафедры «Теплоэнергетика», Торайғыров университет, г. Павлодар, 140003, Республика Казахстан, e-mail: [akmaral70@mail.ru](mailto:akmaral70@mail.ru), <https://orcid.org/0000-0001-5839-3001>

**Карманов Амангельды Ерболович**, PhD, заведующий кафедрой «Теплоэнергетика», Торайғыров университет, г. Павлодар, 140003, Республика Казахстан, e-mail: [aman270685@mail.ru](mailto:aman270685@mail.ru), <https://orcid.org/0000-0001-7512-0275>

**Калтаев Абдулла Габдылманулы**, PhD, ассоц. профессор (доцент), Торайғыров университет, г. Павлодар, 140008, Республика Казахстан, e-mail: [abdulla911@mail.ru](mailto:abdulla911@mail.ru), <https://orcid.org/0000-0003-1684-3347>

**Калимулдина Гульнур Сериковна**, PhD, ассистент профессор, Назарбаев университет, г. Астана, 010000, Республика Казахстан, e-mail: [gkalimuldina@nu.edu.kz](mailto:gkalimuldina@nu.edu.kz), <https://orcid.org/0000-0001-9185-3217>

**Култан Исламбек Берикович**, м.т.н., Кызылординский университет имени Коркыт Ата, Инженерно-технологический институт, г. Кызылорда, 020000, Республики Казахстан, e-mail: [islambek.kultan@mail.ru](mailto:islambek.kultan@mail.ru), <https://orcid.org/0000-0001-9485-0425>

**Колесников Евгений Николаевич**, PhD Постдокторант кафедры «Электротехника и автоматизация, Торайғыров университет, г. Павлодар, 140000, Республика Казахстан, e-mail: [jeka89\\_pvl@mail.ru](mailto:jeka89_pvl@mail.ru), <https://orcid.org/0000-0002-2334-5146>

**Мустагулова Бона Жанабаевна**, ст. преподаватель, Алматинский университет энергетики и связи имени Г. Даукеева, Кафедра «Возобновляемых и альтернативных источников энергии», г. Алматы, 050013, Республика Казахстан, e-mail: [b.mustagulova@aes.kz](mailto:b.mustagulova@aes.kz), <https://orcid.org/0009-0006-7060-5293>

**Мехтиев Али Джаванширович**, кандидат технических наук, ассоц. профессор кафедры эксплуатации электрооборудования, «Казахский агротехнический исследовательский университет имени С. Сейфуллина», Астана қ., 010011, Республика Казахстан, e-mail: [a.mekhtiyev@kazatu.edu.kz](mailto:a.mekhtiyev@kazatu.edu.kz), <https://orcid.org/0000-0002-2633-3976>,

**Марковский Вадим Павлович**, кандидат технических наук, профессор кафедры «Электроэнергетика», Торайғыров университет, г. Павлодар, 140008, Республика Казахстан, e-mail: [wadim54@mail.ru](mailto:wadim54@mail.ru), <https://orcid.org/0000-0002-8519-7679>

**Меирбекова Оксана Даировна**, ст. преподаватель, Международный казахско–турецкий университет имени Хожди Ахмеда Ясави, г. Туркестан, 161200, Республика Казахстан, e-mail: [oksana\\_120183@mail.ru](mailto:oksana_120183@mail.ru), <https://orcid.org/0000-00030949-1443>

**Манатбаев Рустем Кусайынгазиевич**, кандидат технических наук, ассоц. профессор, КазНУ имени аль-Фараби. Физико-технический факультет.

Кафедра теплофизики и технической физики, г. Алматы, 050040, Республика Казакстан, e-mail: [rustemmanatbayev@gmail.com](mailto:rustemmanatbayev@gmail.com), <https://orcid.org/0000-0003-2151-2606>

**Мұхамбетжан Айсұлу Мұхамбетжанқызы**, кандидат физико-математических наук, руководитель управления Кызылординского открытого университета, Республика Казахстан, г. Кызылорда, 120016, e-mail: <https://orcid.org/0000-0003-0799-6229>, [aisulumuhankyzy@mail.ru](mailto:aisulumuhankyzy@mail.ru)

**Мубарак Асем**, Ассистент исследователя, магистр наук, Назарбаев университет, г. Астана, 010000, Республика Казахстан, e-mail: [Assem.mubarak@nu.edu.kz](mailto:Assem.mubarak@nu.edu.kz), <https://orcid.org/0009-0003-3126-5378>

**Нефтисов Александр**, PhD, ассоц. профессор, директор научно-инновационного центра «Industry 4.0», Astana IT University, г. Астана, Казахстан, 010000 e-mail: [alexandr.neftissov@astanait.edu.kz](mailto:alexandr.neftissov@astanait.edu.kz) <https://orcid.org/0000-0003-4079-2025>

**Назаров Есенжол Асылбекулы**, кандидат технических наук, ст. преподаватель ОП «Биология, география и химия» Кызылординского университета имени Коркыт Ата, 120000. г. Кызылорда, Республика Казахстан, e-mail: [Nazarov197514@mail.ru](mailto:Nazarov197514@mail.ru), <https://orcid.org/0000-0003-2368-6466>

**Неберекутина Наталия Сергеевна**, Кандидат технических наук, преподаватель, Государственное автономное профессиональное учреждение Челябинской области Политехнический колледж, г. Магнитогорск, 455045, Российская Федерация, e-mail: [natalia.73@mail.ru](mailto:natalia.73@mail.ru), <https://orcid.org/0009-0004-8098-9820>

**Новожилов Александр Николаевич**, доктор технических наук, профессор, кафедра «Электроэнергетика» Торайғыров университет, Павлодар, 140008, Республика Казахстан, e-mail: [novozhilova\\_on@mail.ru](mailto:novozhilova_on@mail.ru), <https://orcid.org/0000-0001-7530-5034>

**Новожилов Тимофей Александрович**, Кандидат технических наук, доцент кафедры «Электроснабжение промышленных предприятий» Омский государственный технический университет, г. Омск, 644050, Российская Федерация, e-mail: [timokvey@mail.ru](mailto:timokvey@mail.ru), <https://orcid.org/0000-0003-0293-7852>

**Никифоров Александр Степанович**, доктор технических наук, профессор кафедры «Теплоэнергетика», Торайғыров университет, г. Павлодар, 140003, Республика Казахстан, e-mail: [aleks4599@mail.ru](mailto:aleks4599@mail.ru), <https://orcid.org/0000-0002-6977-0957>

**Олжабаева Карлыгаш Сериковна**, PhD, "Алматинский университет энергетики и связи имени Г. Даукеева, Кафедра «Тепло энергетических установок», г. Алматы, 050013, Республика Казахстан, e-mail: [k.olzhabayeva@aes.kz](mailto:k.olzhabayeva@aes.kz), <https://orcid.org/0000-0002-2018-8835>

**Оспанов Ербол Амангазович**, ассоц. профессор кафедры IT технологий, PhD, Шакарим университет, г. Семей, 071412, Республика Казахстан, e-mail: [y.ospanov@shakarim.kz](mailto:y.ospanov@shakarim.kz), <https://orcid.org/0000-0001-5342-274X>

**Омаров Батырхан Султанович**, PhD, ассоц. профессор, Факультет Компьютерных технологий и кибербезопасности, Международный университет информационных технологий, г. Алматы, 050010, Республика Казахстан, e-mail: [batyahan@gmail.com](mailto:batyahan@gmail.com), <https://orcid.org/0000-0002-8341-7113>

**Онгар Булбул**, PhD, ассоц. профессор, Казахский национальный исследовательский технический университет имени К. И. Сатпаева (КазНИТУ), г. Алматы, 050013, Республика Казахстан, e-mail: [b.ongar@satbayev.university](mailto:b.ongar@satbayev.university), <https://orcid.org/0000-0002-8333-8343>

**Өмірбаева Айжан Өмірбайқызы**, докторант по образовательной программе «Теплоэнергетика», Транспортно-энергетический факультет, Евразийский национальный университет имени Л. Н. Гумилева, г. Астана, 01008, Республика Казахстан, e-mail: [a.omerbaeva@mail.ru](mailto:a.omerbaeva@mail.ru), <https://orcid.org/0000-0001-5008-5135>

**Пушкарев Сергей Дмитриевич**, магистр, ст. преподаватель кафедра «Электроэнергетика» Костанайский региональный университет имени Ахмет Байтұрсынұлы, г. Костанай, 110000, Республика Казахстан, e-mail: [Medpromexport@mail.ru](mailto:Medpromexport@mail.ru), <https://orcid.org/0009-0003-2888-2228>

**Приходько Евгений Валентинович**, кандидат технических наук, профессор кафедры «Теплоэнергетика», Торайғыров университет, г. Павлодар, 140003, Республика Казахстан, e-mail: [john1380@mail.ru](mailto:john1380@mail.ru), <https://orcid.org/0000-0003-2168-2285>

**Потапенко Александра Олеговна**, PhD, Торайғыров Университет, 140007 Республика Казахстан, г. Павлодар. e-mail: [alxopt@gmail.com](mailto:alxopt@gmail.com), [0000-0002-9523-5333](https://orcid.org/0000-0002-9523-5333)

**Расмухаметова Айнур Сериковна**, PhD, ассоц. профессор «Алматынский университет энергетики и связи имени Г. Даукеева, Кафедра «Возобновляемых и альтернативных источников энергии», г. Алматы, 050013, Республика Казахстан, e-mail: [a.rasmukhametova@aues.kz](mailto:a.rasmukhametova@aues.kz), <https://orcid.org/0000-0003-1376-6112>

**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](mailto:nasim52@mail.ru), <https://orcid.org/0000-0003-0949-1443>

**Рахимбердинова Дилара Муратовна**, PhD, ассоц. профессор кафедра «Электротехника и автоматизация, Торайғыров университет, г. Павлодар, 140000, Республика Казахстан, e-mail: [di\\_lara83@mail.ru](mailto:di_lara83@mail.ru), <https://orcid.org/0000-0002-2985-9498>

**Сарсикеев Ермек Жасланович**, кандидат технических наук, доктор философии, заведующий кафедрой «Эксплуатация электрооборудования», «Казахский агротехнический исследовательский университет имени С. Сейфуллина», г. Астана, 010011, Республика Казахстан, e-mail: [sarsikeev.yermek@yandex.ru](mailto:sarsikeev.yermek@yandex.ru), <https://orcid.org/0000-0002-7209-5024>,

**Сагинов Гылым Аргынович**, магистрант, специальность «Автоматизация и управление», Факультет энергетики, Торайғыров университет, г. Павлодар, 140008, Республика Казахстан, e-mail: [vergaliev10@gmail.com](mailto:vergaliev10@gmail.com), <https://orcid.org/0009-0005-0567-7189>

**Сарсенбаева Гаухар Асановна**, Магистр, Факультет машиностроения, энергетики и информационных технологий, Костанайский региональный университет имени Ахмет Байтұрсынұлы, г. Костанай, 110000, Республика Казахстан, e-mail: [s.gaukhar1982@gmail.com](mailto:s.gaukhar1982@gmail.com), <https://orcid.org/0009-0002-2571-4176>

**Смайлов Нуржигит Куралбаевич**, PhD, ассоц. профессор, Кафедра Электроники, телекоммуникации и космических технологий, Институт автоматизации и информационных технологий, Алматы, 050010, Республика Казахстан, e-mail: [n.smailov@satbayev.university](mailto:n.smailov@satbayev.university), <https://orcid.org/0000-0002-7264-2390>

**Сарсембаев Баянды Казыбекович**, PhD, ассоц. профессор, Astana IT University, г. Астана, 010000, Республика Казахстан, e-mail: [bayandy.sarsembayev@astanait.edu.kz](mailto:bayandy.sarsembayev@astanait.edu.kz), <https://orcid.org/0000-0002-1087-4436>

**Сыдыкова Гульнар Кудайбергеновна**, кандидат технических наук, ассоц. профессор, Кызылординский университет имени Коркыт Ата, Инженерно-технологический институт, Кызылорда, 020000, Республики Казахстан, e-mail: [sydykova77@mail.ru](mailto:sydykova77@mail.ru), <https://orcid.org/0000-0002-6841-028X>

**Сагындык Айгерим Бекенқызы**, PhD, постдокторант Торайғыров университет, Факультет энергетики, г. Павлодар, 140008, Республика Казахстан, e-mail: [aiko\\_90@mail.ru](mailto:aiko_90@mail.ru), <https://orcid.org/0000-0003-0376-2150>

**Талипов Олжас Манарбекович**, PhD, профессор, заведующий, кафедрой Электротехника и автоматизация, Факультет энергетики, Торайғыров университет, г. Павлодар, 140008, Республика Казахстан, e-mail: [talipov1980@mail.ru](mailto:talipov1980@mail.ru), <https://orcid.org/0000-0002-8355-1769>

**Танжариков Панабек Абсатович**, кандидат технических наук, профессор ОП "Инжиниринговые технологии" Кызылординского университета имени Коркыт Ата, 120000. г. Кызылорда, Республика Казахстан, e-mail: [pan\\_19600214@mail.ru](mailto:pan_19600214@mail.ru), <https://orcid.org/0000-0002-6490-9972>

**Тайманов Смайыл Тамшыбаевич**, кандидат технических наук, старший преподаватель кафедра Электроэнергетики, техносферной



безопасности и экологии Кызы-лординского университета им. Коркыт Ата, Республика Казахстан, г. Кызылорда, 120014, e-mail: <https://orcid.org/0000-0001-5375-1180>, [smaiyl\\_taimanov@mail.ru](mailto:smaiyl_taimanov@mail.ru)

**Утегулов Арман Болатбекович**, кандидат технических наук, ассоц. профессор кафедры «Электро энергетика, Евразийский национальный университет имени Л. Н. Гумилева, г. Астана, 010011, Республика Казахстан, e-mail: [utegulov76@mail.ru](mailto:utegulov76@mail.ru), <https://orcid.org/0000-0001-8637-3665>

**Успанова Анастасия Игоревна**, магистр, ст.преподаватель кафедра «Математики и физики», Костанайский региональный университет имени Ахмет Байтұрсынұлы, г. Костанай, 110000, Республика Казахстан, e-mail: [Kamorrasweet1@gmail.com](mailto:Kamorrasweet1@gmail.com), <https://orcid.org/0000-0002-3484-8750>

**Шукманов Жанибек Ерикович**, ст. преподаватель, кафедра «Автоматизация и телекоммуникация», Технологический факультет, Таразский региональный университет имени М. Х. Дулати, г. Тараз, 080000, Республика Казахстан, e-mail: <https://orcid.org/0000-0003-3017-7133>, [zhe.shukamanov@dulaty.kz](mailto:zhe.shukamanov@dulaty.kz).

**Шимпф Алексей**, заведующий лабораториями кафедры «Электротехники и автоматизации», г. Павлодар, 140000, Республика Казахстан, e-mail: [shimpf5329@gmail.com](mailto:shimpf5329@gmail.com), <https://orcid.org/0000-0003-4203-9117>

**Шандронов Дмитрий Николаевич**, преподаватель института военно-инженерных работ по радиоэлектронике и связи, Алматы, 050010 Республика Казахстан, e-mail: [shan\\_dima@mail.ru](mailto:shan_dima@mail.ru), <https://orcid.org/0000-0001-6904-8000>

**Шеръязов Сакен Койшыбаевич**, доктор технических наук, профессор, профессор кафедры «Энергообес-печение и автоматизация технологических процессов», Южно-Уральского государственного аграрного университета, Российская Федерация, г. Челябинск, 454003, профессор кафедра «Электро-энергетика» Евразийского национального исследовательского университета имени Л. Н. Гумилева, Республика Казахстан, г. Астана, 010009, e-mail: <https://orcid.org/0000-0001-8795-5114>, [sakenu@yandex.ru](mailto:sakenu@yandex.ru).

**Шоланов Корганбай Сагнаевич**, док. техн. наук, профессор. Казахский агротехнический исследовательский университет имени С. Сейфуллина, г. Астана, 010000, Республика Казахстан, e-mail: [sholkor@gmail.ru](mailto:sholkor@gmail.ru), <https://orcid.org/0000-0002-2077-7883>

## INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

**Auyezkhanov Darkhan Azamatovich**, doctoral student in «Automation and control», Faculty of Energy, S. Seifullin Kazakh Agrotechnical Research University, Astana city, 010011, Republic of Kazakhstan, e-mail: [dauyezkhanov@gmail.com](mailto:dauyezkhanov@gmail.com), <https://orcid.org/0009-0006-4164-1033>

**Akayev Aibek**, PhD, School of architecture, civil engineering and energy, D. Serikbayev East Kazakhstan Technical University, Ust-Kamenogorsk, 070000, Republic of Kazakhstan, e-mail: [aybek.akaev.vko\\_81@mail.ru](mailto:aybek.akaev.vko_81@mail.ru), <https://orcid.org/0000-0001-9390-5703>

**Aripova Nazgul Mikhailovna**, Doctoral student of the Department of Heat Power Engineering, Toraigyrov University, Pavlodar, 140003, Republic of Kazakhstan, e-mail: [nazgul\\_2010@mail.ru](mailto:nazgul_2010@mail.ru), <https://orcid.org/0000-0003-2760-8617>

**Abdurakhman Aldiyarov**, acting professor of physical and technical faculty, al-Farabi KazNU, Almaty, 050040, Republic of Kazakhstan, e-mail: [abdurakhman.aldiyarov@kaznu.kz](mailto:abdurakhman.aldiyarov@kaznu.kz), <https://orcid.org/0000-0002-5091-7699>

**Anarbayev Alibek Yersainovich**, senior teacher, Faculty of Energy, Toraighyrov University, Pavlodar, 140008, Republic of Kazakhstan, e-mail: [alibek\\_anarbaev@mail.ru](mailto:alibek_anarbaev@mail.ru), <https://orcid.org/0000-0001-6890-8005>

**Auyeskhan Akniyet**, A master's student at the De-partment of "Electric Power Engineering" of the L. N. Gumilyov Eurasian National University, Republic of Kazakhstan, Astana, Index: 010009, Republic of Kazakhstan, e-mail: [a.aueskhan@inbox.ru](mailto:a.aueskhan@inbox.ru), <https://orcid.org/0009-0001-1591-6789>

**Anar Arinova**, Research Assistant, Master of Science, Nazarbayev University, Astana, 010000, Republic of Kazakhstan, e-mail: [Anar.arinova@nu.edu.kz](mailto:Anar.arinova@nu.edu.kz), <https://orcid.org/0000-0002-7780-4555>

**Akbarov Dilmurod**, Basic doctoral student, Department Electrical Technology and Using of Electrical Equipment, Tashkent Institute of Irrigation and Agricultural Mechanization Engineers, 100000 Tashkent, The Republic of Uzbekistan, e-mail: [dakbarov@umail.uz](mailto:dakbarov@umail.uz), <https://orcid.org/0000-0002-8689-0619>

**Aituganova Aisha Menlibaikyzy**, master's degree in pedagogical sciences., Korkyt Ata Kyzylorda University, Institute of Engineering and technology, Kyzylorda, 020000, The Republic Of Kazakhstan, e-mail: [mag\\_zhan97@mail.ru](mailto:mag_zhan97@mail.ru), <https://orcid.org/0000-0002-8141-5157>

**Assainov Gibrat Zholamanovich**, PhD, senior lecturer of the Department of "Electr Power Supply" Kazakh Agrotechnical Research University named after S. Seifullin, Astana, 010000, The Republic of Kazakhstan, e-mail: [asainovgibrat@gmail.com](mailto:asainovgibrat@gmail.com), <https://orcid.org/0000-0002-1330-5909>

**Badenova Zhanar Ramazanovna**, doctoral student in «Heat Power Engineering», School of architecture, civil engineering and energy, D. Serikbayev

East Kazakhstan technical University, Ust-Kamenogorsk, 070000, Republic of Kazakhstan, e-mail: [janara1993m@mail.ru](mailto:janara1993m@mail.ru), <https://orcid.org/0009-0002-7326-1714>

**Bondartsev David**, PhD, professor of AUPET, Associate Professor HCC, 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](mailto:d.bondartsev@aes.kz), <https://orcid.org/0000-0001-8778-7851>

**Baiseitov Gani**, PhD, R&D Center «Kazakhstan Engineering» LLP, Astana, 010000, Republic of Kazakhstan; e-mail: [baiseitov1970@mail.ru](mailto:baiseitov1970@mail.ru) ID: <https://orcid.org/0009-0001-0154-0071>

**Bayanbaev Kairat Amangeldinovich**, Master of Engineering, Satbayev University, Almaty, 050013, Republic of Kazakhstan, e-mail: [k.bayanbayev@satbayev.university](mailto:k.bayanbayev@satbayev.university), <https://orcid.org/0000-0001-9635-0424>

**Babakhan Shokhrukh Abdilkasymovich**, Senior Lecturer, Akhmet Yassawi International Kazakh–Turkish University, Turkistan, 161200, Republic of Kazakhstan, e-mail: [babakhan.shokhrukh@ayu.edu.kz](mailto:babakhan.shokhrukh@ayu.edu.kz), <https://orcid.org/0000-0002-7723-0045>

**Berguzinov Askhat Nurlanovich**, PhD, Professor, Toraighyrov University, Pavlodar, 140008, Republic of Kazakhstan, e-mail: [askhat\\_berguzinov@mail.ru](mailto:askhat_berguzinov@mail.ru), <https://orcid.org/0000-0001-6954-8259>

**Genbach Alexander**, A. Doctor of technical sciences, professor of AUPET, 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](mailto:a.genbach@aes.kz), <https://orcid.org/0009-0001-3819-4387>

**Janaliev Balatay Muratovich**, master, department of «Automation, telecommunications and management», South Kazakhstan University named after M. Auezov, Shymkent, 160001, Republic of Kazakhstan, e-mail: [balatai86.22@mail.ru](mailto:balatai86.22@mail.ru), <https://orcid.org/0009-0000-1474-5423>

**Druzhinin Valeriy Mikhailovich**, PhD, senior lecturer, Department of Power Engineering, Karaganda industrial university, Temirtau, 101400, Republic of Kazakhstan, e-mail: [druzhinin\\_vm@mail.ru](mailto:druzhinin_vm@mail.ru), <https://orcid.org/0000-0001-7261-8780>

**Duisenbek Zhansaya Serikovna**, PhD, assistant professor, Department of Ecology and Management in Engineering, Almaty University of Power Engineering and Telecommunications named after Gumarbek Daukeyev, Almaty, Astana, 050013, Republic of Kazakhstan, e-mail: [zhaniko.adina@mail.ru](mailto:zhaniko.adina@mail.ru), <https://orcid.org/0000-0001-7844-4240>

**Dodaev Sultan**, master, Al-farabi Kazakh National University. Faculty of physics and technology. Thermal physics and technical physics, Almaty,

050040, Republic of Kazakhstan, e-mail: [dodaev230199@gmail.com](mailto:dodaev230199@gmail.com), <https://orcid.org/0009-0006-0357-4618>

**Yerdybayeva Nazgul Kadyrbekovna**, Doctor of Physical and Mathematical Sciences, School of architecture, civil engineering and energy, D. Serikbayev East Kazakhstan technical University, Ust-Kamenogorsk, 070000, Republic of Kazakhstan, e-mail: [nyerdybayeva@mail.ru](mailto:nyerdybayeva@mail.ru), <https://orcid.org/0000-0003-0314-0503>

**Yesmakhanova Laura**, PhD, Doctor of the Department of Automation and Telecommunications, Faculty of Technology, M. Kh. Dulaty Taraz Regional University, Taraz, 080000, The Republic of Kazakhstan, e-mail: [laura060780@mail.ru](mailto:laura060780@mail.ru), <https://orcid.org/0000-0002-3308-9676>

**Eleuova Elmira Shoraevna**, Candidate of Agricultural Sciences, senior lecturer of the OP "Water management and Land Management" of the Korkyt Ata Kyzylorda University, 120000, Kyzylorda city. e-mail: [eleuovaelmira@mail.ru](mailto:eleuovaelmira@mail.ru), <https://orcid.org/0000-0002-6488-2714>

**Yergali Mustafa Aidarly**, master's student in «Modern and innovative technologies of renewable energy» «Almaty University of Power Engineering and telecommunications named after Gumarbek Daukeev», «Department of Renewable and Alternative Energy Sources», Almaty, 050043, Republic of Kazakhstan, e-mail: [m.ergali@aes.kz](mailto:m.ergali@aes.kz), <https://orcid.org/0009-0006-7060-5293>

**Yerezhep Darkhan**, associate professor of institute of Energy and mechanical engineering named after A. Burkitbayev, Satbayev University, Almaty, 050013, Republic of Kazakhstan, e-mail: [darhan\\_13@physics.kz](mailto:darhan_13@physics.kz), <https://orcid.org/0000-0002-2232-2911>

**Yershina Ainagul Kapasovna**, Professor, Department of Physics, Kazakh National Women's Pedagogical University, Departments of Physics Almaty, 050040, Kazakhstan, e-mail: [123ainakul.yershina@gmail.com](mailto:123ainakul.yershina@gmail.com), <https://orcid.org/0000-0002-6811-3904>

**Zhalmagambetova Ultuar**, Associate Professor of the Department of Electrical Engineering and Automation Toraighyrov University, Pavlodar, 140000, Republic of Kazakhstan, e-mail: [ultuara@mail.ru](mailto:ultuara@mail.ru), <https://orcid.org/0000-0002-2261-2222>

**Zhumadirova Aliya Kairullova**, Candidate of Technical Sciences, Associate Professor of the Electrical Power Engineering Department, Faculty of Energy, Toraighyrov University, Pavlodar, 140008, Republic of Kazakhstan, e-mail: [zhumadirova.a@teachers.tou.edu.kz](mailto:zhumadirova.a@teachers.tou.edu.kz), <https://orcid.org/0000-0003-0232-6779> 87079001251

**Zhumagulov Mikhail**, Phd, associate professor. faculty of Transport and Energy, Department of «Thermal Power Engineering», Eurasian national university named after L.N. Gumilyov, Astana, 140008, Republic of Kazakhstan, e-mail: [zhmg\\_9@mail.ru](mailto:zhmg_9@mail.ru), <https://orcid.org/0000-0002-2702-7292>

**Zhumagulov Temirbek Zhamedovich**, candidate of technical Sciences, Senior lecturer of the OP "Engineering Technologies" of the Korkyt Ata Kyzylorda University, 120000, Kyzylorda city, Republic of Kazakhstan, e-mail: [temur\\_mgm@mail.ru](mailto:temur_mgm@mail.ru), <https://orcid.org/0000-0002-3048-6596>

**Zhabagiev Aslan Mukhamediyarovich**, Candidate of Technical Sciences, senior lecturer of the EP "Engineering Technologies" of the Korkyt Ata Kyzylorda University, 120000, Kyzylorda, Kuserbaeva str., Republic of Kazakhstan, e-mail: [zhabagiev@korkyt.kz](mailto:zhabagiev@korkyt.kz), <https://orcid.org/0000-0002-7720-0911>

Zhumatova Asel Akanovna, Master of Technical Sciences, Senior Lecturer Kazakh National Research Technical University named after K. I. Satpayev (KazNITU), Almaty city, 050000, Republic of Kazakhstan, e-mail: [a.zhumatova@satbayev.university.kz](mailto:a.zhumatova@satbayev.university.kz), <https://orcid.org/0000-0001-9606-7557>

**Zhakupov Nazhmitden Berekeiliy**, senior lecturer of the Department of "Electric Power Supply" Kazakh Agrotechnical Research University named after S. Seifullin, Astana, 010000, The Republic of Kazakhstan e-mail: [nazhmiden@mail.ru](mailto:nazhmiden@mail.ru), <https://orcid.org/0009-0005-7239-2095>

**Zyuzev Anatoliy Mikhailovich**, Doctor of Technical Sciences, Professor, Ural Power Engineering Institute, Ural Federal University named after the First President of Russia B.N. Yeltsin, Ekaterinburg, 620062, Russian Federation, e-mail: [a.m.zyuzev@urfu.ru](mailto:a.m.zyuzev@urfu.ru), <https://orcid.org/0000-0002-2233-2730>

**Issabekov Zhanat Beisembayevich**, PhD, Associate Professor, Head of the Department of Electrical Engineering and Automation of the Faculty of Energy, Toraigyrov University, Pavlodar, 140008, Republic of Kazakhstan, e-mail: [zh\\_is@mail.ru](mailto:zh_is@mail.ru), <https://orcid.org/0000-0003-3980-1617>

**Ibragimova Svetlana Viktorovna**, Candidate of Technical Sciences, professor assistant, Faculty of Mechanical Engineering, Energy and Information Technologies, Kostanay, 110000, Republic of Kazakhstan, e-mail: [ibragimovasvetlana75@gmail.com](mailto:ibragimovasvetlana75@gmail.com), <https://orcid.org/0000-0003-2798-9149>

**Issabekova Bibigul Beisembayevna**, PhD, Associate Professor, Faculty of computer science, Toraigyrov University, Pavlodar, 140008, Republic of Kazakhstan, e-mail: [asbizh@mail.ru](mailto:asbizh@mail.ru), <https://orcid.org/0000-0001-5044-3211>

**Ikram Zhanseri**, doctoral student in «Information Security Systems», Faculty of Information Systems, Al-Farabi Kazakh National University, Almaty, 050010, Republic of Kazakhstan, e-mail: [zhanserikz@gmail.com](mailto:zhanserikz@gmail.com), <https://orcid.org/0009-0001-8059-6590>

**Isataev Muhtar**, Associate Professor, Al-farabi Kazakh National University. Faculty of physics and technology. Thermal physics and technical physics. Almaty, 050040, Republic of Kazakhstan, e-mail: [muhtar.isataev@kaznu.kz](mailto:muhtar.isataev@kaznu.kz), <https://orcid.org/0000-0001-8248-670X>

**Kaly Nurbolat Askaruly**, master student in Automation and Control, Faculty of Energy, Toraigyrov University, Pavlodar, 140008, Republic of Kazakhstan, e-mail: [vergaliyev10@gmail.com](mailto:vergaliyev10@gmail.com), <https://orcid.org/0009-0001-1315-2615>

**Kislov Alexander**, Professor of the Department of Electrical Engineering and Automation, Toraigyrov University, Pavlodar, 140000, Republic of Kazakhstan, e-mail: [kislovpsu@mail.ru](mailto:kislovpsu@mail.ru), <https://orcid.org/0000-0003-4816-8008>

**Krykbayeva Maryam**, Toraigyrov University, Sity Pavlodar, 140008, Republic of Kazakhstan, e-mail: [mgn017@mail.ru](mailto:mgn017@mail.ru), <https://orcid.org/0009-0001-0770-5164>

**Kenbay Alisher**, doctoral student of physical and technical faculty, al-Farabi KazNU, Almaty, 050040, Republic of Kazakhstan, e-mail: [a.kenbay@satbayev.university](mailto:a.kenbay@satbayev.university), <https://orcid.org/0000-0001-6803-5873>

**Kulikov Anatoliy Petrovich**, System Architect, LLP «C-NRG» (Synergy) Almaty, 050051, Republic of Kazakhstan, e-mail: [anatoliy.kulikov1990@gmail.com](mailto:anatoliy.kulikov1990@gmail.com), <https://orcid.org/0009-0007-3908-8432>

**Kaverin Vladimir Viktorovich**, Candidate of Technical Sciences, Associate Professor, Faculty of power engineering, automation and telecommunications, Abylka Saginov Karaganda Technical University, Karaganda, 100012, Republic of Kazakhstan, e-mail: [kaverinkz@inbox.ru](mailto:kaverinkz@inbox.ru), <https://orcid.org/0000-0003-2021-7445>

**Kozhakhmetova Dinara**, Associate Professor of the Department of IT Technologies, PhD, Shakarim University, Semey, 071412, Republic of Kazakhstan, e-mail: [dinara\\_kozhahmet@mail.ru](mailto:dinara_kozhahmet@mail.ru), <https://orcid.org/0000-0002-4327-3899>

**Koshkin Igor Vladimirovich**, candidate of technical sciences, department of "Electric Power Engineering" Kostanay Regional University named after Akhmet Baitursynuly, Kostanay, 110000, Republic of Kazakhstan, e-mail: [elektroenergetika@mail.ru](mailto:elektroenergetika@mail.ru), <https://orcid.org/0000-0003-3818-3781>

**Kinzhibekova Akmaral Kabidenovna**, Candidate of Technical Sciences, Associate Professor of the Department of Heat Power Engineering, Toraigyrov University, Pavlodar, 140003, Republic of Kazakhstan, e-mail: [akmaral70@mail.ru](mailto:akmaral70@mail.ru), <https://orcid.org/0000-0001-5839-3001>

**Karmanov Amangeldy Erbolovich**, Doctor PhD, Head of the Department of Heat Power Engineering, Toraigyrov University, Pavlodar, 140003, Republic of Kazakhstan, e-mail: [aman270685@mail.ru](mailto:aman270685@mail.ru), <https://orcid.org/0000-0001-7512-0275>

**Kaltayev Abdulla Gabdylmanapuly**, Associate Professor, Toraigyrov University, Pavlodar, 140000, Republic of Kazakhstan, e-mail: [abdulla911@mail.ru](mailto:abdulla911@mail.ru), <https://orcid.org/0000-0003-1684-3347>

**Kalimuldina Gulnur**, Assistant Professor, PhD, Nazarbayev University, Astana, 010000, Republic of Kazakhstan, e-mail: [gkalimuldina@nu.edu.kz](mailto:gkalimuldina@nu.edu.kz), <https://orcid.org/0000-0001-9185-3217>,

**Kultan Islambek**, Master of Technical Sciences, Korkyt Ata Kyzylorda University, Institute of Engineering and technology, Kyzylorda, 020000, The Republic of Kazakhstan, e-mail: [islambek.kultan@mail.ru](mailto:islambek.kultan@mail.ru), <https://orcid.org/0000-0001-9485-0425>

**Колесников Евгений Николаевич**, PhD Postdoctoral student of the Department of Electrical Engineering and Automation, «Electric Power Engineering», Toraigyrov University, Pavlodar, 140000, Republic of Kazakhstan, e-mail: [jeka89\\_pvl@mail.ru](mailto:jeka89_pvl@mail.ru), <https://orcid.org/0000-0002-2334-5146>

**Mustagulova Вора**, Senior lecturer, «Almaty University of Power Engineering and telecommunications named after Gumarbek Daukeev», «Department of Renewable and Alternative Energy Sources», Almaty, 050013, Republic of Kazakhstan, e-mail: [b.mustagulova@aus.kz](mailto:b.mustagulova@aus.kz), <https://orcid.org/0009-0006-7060-5293>

**Mekhtiev Ali Javanshirovi**, Candidate of Technical Sciences, Associate Professor. Department of Electrical Equipment Operation, S. Seifullin Kazakh Agrotechnical Research University, Astana city, 010011, Republic of Kazakhstan, e-mail: [a.mekhtiyev@kazatu.edu.kz](mailto:a.mekhtiyev@kazatu.edu.kz), <https://orcid.org/0000-0002-2633-3976>

**Markovskiy Vadim Pavlovich**, candidate of technical sciences, professor of the Department of Electrical Power Engineering, Toraigyrov University, Pavlodar, 140008, Republic of Kazakhstan, e-mail: [wadim54@mail.ru](mailto:wadim54@mail.ru), <https://orcid.org/0000-0002-8519-7679>

**Meirbekova Oxana Dairovna**, Senior Lecturer, Akhmet Yassawi International Kazakh–Turkish University, Turkistan, 161200, Republic of Kazakhstan, e-mail: [oksana\\_120183@mail.ru](mailto:oksana_120183@mail.ru), <https://orcid.org/0000-00030949-1443>

**Manatbayev Rustem**, Associate Professor, Al-farabi Kazakh National University. Faculty of physics and technology. Thermal physics and technical physics, Almaty, 050040, Republic of Kazakhstan, e-mail: [rustemmanatbayev@gmail.com](mailto:rustemmanatbayev@gmail.com), <https://orcid.org/0000-0003-2151-2606>

**Mukhambetzhana Aisulu**, Candidate of Physical and Mathematical Sciences, Head of the Department at Open University of Kyzylorda, Republic of Kazakhstan, Kyzylorda c., 120016, e-mail: [aisulumuhankyzy@mail.ru](mailto:aisulumuhankyzy@mail.ru), <https://orcid.org/0000-0003-0799-6229>

**Mubarak Assem**, Research Assistant, Master of Science, Nazarbayev University, Astana, 010000, Republic of Kazakhstan, e-mail: [Assem.mubarak@nu.edu.kz](mailto:Assem.mubarak@nu.edu.kz), <https://orcid.org/0009-0003-3126-5378> 010000

**Neftissov Alexander**, PhD, Associate Professor, Research and innovation center "Industry 4.0", Astana IT University, Astana, Republic of Kazakhstan,

010000, e-mail: [alexandr.neftissov@astanait.edu.kz](mailto:alexandr.neftissov@astanait.edu.kz), <https://orcid.org/0000-0003-4079-2025>

**Nazarov Yessenzhol**, candidate of technical Sciences, Senior lecturer of the OP "Biology, geography and chemistry" of the Korkyt Ata Kyzylorda University, 120000. Kyzylorda city. Republic of Kazakhstan, e-mail: [Nazarov197514@mail.ru](mailto:Nazarov197514@mail.ru), <https://orcid.org/0000-0003-2368-6466>

**Neberekutina Natalia Sergeevna**, Candidate of Technical Sciences, lecture, SAPEI of Chelyabinsk Region Polytechnic College, Magnitogorsk, 455045, Russian Federation, e-mail: [natalia.73@mail.ru](mailto:natalia.73@mail.ru), <https://orcid.org/0009-0004-8098-9820>

**Novozhilov Alexander Nikolaevich**, Professor of the Department of "Electric Power Engineering", Doctor of Technical Sciences, professor (Kazakhstan), Toraigyrov University, Pavlodar, 140008, Republic of Kazakhstan, e-mail: [novozhilova\\_on@mail.ru](mailto:novozhilova_on@mail.ru), <https://orcid.org/0000-0001-7530-5034>

**Novozhilov Timofey Alexandrovich**, Associate Professor of the Department "Power Supply of Industrial Enterprises", Candidate of Technical Sciences, Omsk State Technical University, Omsk, 644000, Russian Federation, e-mail: [timokvey@mail.ru](mailto:timokvey@mail.ru), <https://orcid.org/0000-0003-0293-7852>

**Nikiforov Alexander Stepanovich**, Doctor of Technical Sciences, Professor of the Department of Heat Power Engineering, Toraigyrov University, Pavlodar, 140003, Republic of Kazakhstan, e-mail: [aleke4599@mail.ru](mailto:aleke4599@mail.ru), <https://orcid.org/0000-0002-6977-0957>

**Olzhabayeva Karlygash Serikovna**, PhD, «Electrical Engineering», «Almaty University of Power Engineering and telecommunications named after Gumarbek Daukeev», «Department of Thermal Power Plants», Almaty, 050013, Republic of Kazakhstan, e-mail: [k.olzhabayeva@aus.kz](mailto:k.olzhabayeva@aus.kz), <https://orcid.org/0000-0002-2018-8835>

**Ospanov Yerbol**, Associate Professor of the Department of IT Technologies, PhD, Shakarim University, Semey, 071412, Republic of Kazakhstan, e-mail: [y.ospanov@shakarim.kz](mailto:y.ospanov@shakarim.kz), <https://orcid.org/0000-0001-5342-274X>

**Omarov Batyrkhan**, PhD, associate professor, Faculty of Computer Technologies and Cybersecurity, International Information Technology University, Almaty, 050010, Republic of Kazakhstan, e-mail: [batyahan@gmail.com](mailto:batyahan@gmail.com), <https://orcid.org/0000-0002-8341-7113>

**Ongar Bulbul**, Associate Professor, PhD, Kazakh National Research Technical University named after K. I. Satpayev (KazNITU), Almaty, 050013, Republic of Kazakhstan, e-mail: [b.ongar@satbayev.university](mailto:b.ongar@satbayev.university), <https://orcid.org/0000-0002-8333-8343>

**Omurbayeva Aizhan**, doctoral student in the educational program «Thermal Power Engineering», faculty of Transport and Energy, Eurasian national university

**ПРАВИЛА ДЛЯ АВТОРОВ  
В НАУЧНОМ ЖУРНАЛЕ  
«ВЕСТНИК ТОРАЙҒЫРОВ УНИВЕРСИТЕТА»,  
«КРАЕВЕДЕНИЕ»**

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 %.**

**\*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.**

**\*Рецензирование проводится конфиденциально («двустороннее слепое рецензирование»), автору не сообщается имя рецензента, а рецензенту – имя автора статьи.**

**\*Статьи отправлять вместе с квитанцией об оплате. Стоимость публикации в журнале за страницу 1000 (одна тысяча) тенге, включая статьи магистрантов и докторантов в соавторстве с лицами с ученой степенью.**

**\* Оплата за статью не возвращается в случае, если статья отклонена антиплагиатом или рецензентом. Автор может повторно отправить статью на антиплагиат или рецензирования 1 раз.**

**Статьи должны быть оформлены в строгом соответствии со следующими правилами:**

– В журналы принимаются статьи по всем научным направлениям, набранные на компьютере, напечатанные на одной стороне листа с полями 30 мм со всех сторон листа, электронный носитель со всеми материалами в текстовом редакторе «Microsoft Office Word (97, 2000, 2007, 2010) для WINDOWS».

– Общий объем статьи, включая аннотации, литературу, таблицы, рисунки и математические формулы не должен превышать **12 страниц** печатного текста. *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, аннотации, ключевые слова, основные положения, введение, материалы и методы, результаты и обсуждение, заключение, выводы, информацию о финансировании (при наличии), список литературы (используемых источников) 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 Фамилия, имя, отчество (полностью)** автора (-ов) – на казахском, русском и английском языках (*жирным шрифтом, по центру*), **главного автора пометить символом (\*)**;

**4 Ученая степень, ученое звание;**

**5 Аффiliation** (факультет или иное структурное подразделение, организация (место работы (учебы)), город, почтовый индекс, страна) – на казахском, русском и английском языках;

**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 – 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.). Рекомендуются 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 / Кіріспе / Introduction** (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 / Қорытынды / Conclusion** (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 / Пайдаланған деректер тізімі / References** (жирными буквами, кегль – 14 пунктов, в центре) включает в себя:

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

ссылки, 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). В случае наличия в списке использованных источников работ, представленных на кириллице, необходимо представить список литературы в двух вариантах: первый – в оригинале, второй – романизированный (транслитерация 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.

**Романизированный список литературы должен выглядеть следующим образом:**

автор(-ы) (транслитерация) → название статьи в транслитерированном варианте → [перевод названия статьи на английский язык в квадратных скобках] → название казахоязычного либо русскоязычного источника (транслитерация, либо английское название – если есть) → выходные данные с обозначениями на английском языке.

**11 Иллюстрации, перечень рисунков и подрисуночные 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.

**12 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		

Информация для авторов

Для статей, публикуемых в Научном журнале Торайғыров университет. Химико-биологическая серия, требуется экспертное заключение.

**Редакция не занимается литературной и стилистической обработкой статьи.**

Если статья отклонена антиплагиатом или рецензентом статья возвращается автору на доработку. Автор может повторно отправить статью на антиплагиат или рецензирования 1 раз. За содержание статьи несет ответственность Автор.

**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.

**Периодичность издания журналов – четыре 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.

**Статьи отправлять вместе с квитанцией об оплате.** Стоимость публикации в журнале за страницу 1000 (одна тысяча) тенге, включая статьи магистрантов и докторантов в соавторстве с лицами с ученой степенью.

**Статью (электронную версию, и квитанции об оплате) следует направлять на сайт: [www.vestnik-energy.tou.edu.kz](http://www.vestnik-energy.tou.edu.kz). Для подачи статьи на публикацию необходимо пройти регистрацию на сайте.**

**140008, Республика Казахстан, г. Павлодар, ул. Ломова, 64,**

НАО «Торайғыров университет»,

**Издательство «Toraighyrov University», каб. 137.**

Тел. 8 (7182) 67-36-69, (внутр. 1147).

E-mail: [kereku@tou.edu.kz](mailto:kereku@tou.edu.kz)

**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 KZ15601024100003308 БИК HSBKCKZKX Кбе 16 Код 16 КНП 861	

**ОБРАЗЕЦ К ОФОРМЛЕНИЮ СТАТЕЙ**

МРНТИ 14.37.27

DOI xxxxxxxxxxxxxxxx

**\*С. К. Антикеева**

Торайғыров университет, Республика Казахстан, г. Павлодар

**ТЕОРЕТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ФОРМИРОВАНИЯ КОМПЕТЕНЦИЙ СОЦИАЛЬНЫХ РАБОТНИКОВ ЧЕРЕЗ КУРСЫ ПОВЫШЕНИЯ КВАЛИФИКАЦИИ**

*В данной статье представлена теоретическая модель формирования личностных и профессиональных компетенций социальных работников через курсы повышения квалификации, которая разработана в рамках докторской диссертации «Формирование личностных и профессиональных компетенций социальных работников через курсы повышения квалификации». В статье приводятся педагогические аспекты самого процесса моделирования, перечислены этапы педагогического моделирования. Представлены методологический, процессуальный (технологический) и инструментальный уровни модели, ее цель, мониторинг сформированности искомым компетенций, а также результат. В модели показаны компетентностный, личностно-ориентированный и практико-ориентированный педагогические подходы, закономерности, принципы, условия формирования выбранных компетенций; описаны этапы реализации процесса формирования, уровни сформированности личностных и профессиональных компетенций. В разделе практической подготовки предлагается интерактивная работа в системе слушатель-преподаватель-группа, подразумевающая личное участие каждого специалиста, а также открытие первого в нашей стране Республиканского общественного объединения «Национальный альянс профессиональных социальных работников». Данная модель подразумевает под собой дальнейшее совершенствование и самостоятельное развитие личностных и профессиональных компетенций социальных работников. Это позволяет увидеть в модели эффективность реализации курсов повышения квалификации, формы, методы и средства работы.*

*Ключевые слова: теоретическая модель, компетенции, повышение квалификации, социальные работники.*

**Введение**

Социальная работа – относительно новая для нашей страны профессия. Поэтому обучение социальных работников на современной стадии не характеризуется наличием достаточно разработанных образовательных стандартов, которые находили бы выражение в формулировке педагогических целей, в содержании, технологиях учебного процесса.

*Продолжение текста публикуемого материала*

**Материалы и методы**

Теоретический анализ научной психолого-педагогической и специальной литературы по проблеме исследования; анализ законодательных и нормативных документов по открытию общественных объединений; анализ содержания программ курсов повышения квалификации социальных работников; моделирование; анализ и обобщение педагогического опыта; опросные методы (беседа, анкетирование, интервьюирование); наблюдение; анализ продуктов деятельности специалистов; эксперимент, методы математической статистики по обработке экспериментальных данных.

*Продолжение текста публикуемого материала*

**Результаты и обсуждение**

Чтобы понять объективные закономерности, лежащие в основе процесса формирования и развития личностных и профессиональных компетенций социальных работников через курсы повышения квалификации, необходимо четко представлять себе их модель.

*Продолжение текста публикуемого материала*

**Выводы**

Таким образом, на основании вышеизложенного можно сделать вывод о том, что теоретическая модель формирования личностных и профессиональных компетенций социальных работников через курсы повышения квалификации содержит три уровня ее реализации.

*Продолжение текста публикуемого материала*

**Список использованных источников**

1 **Дахин, А. Н.** Педагогическое моделирование : сущность, эффективность и неопределенность [Текст] // Педагогика. – 2003. – № 4. – С. 22.

2 **Кузнецова, А. Г.** Развитие методологии системного подхода в отечественной педагогике : монография [Текст]. – Хабаровск : Изд-во ХК ИППК ПК, 2001. – 152 с.

3 **Каропа, Г. Н.** Системный подход к экологическому образованию и воспитанию (На материале сельских школ) [Текст]. – Минск, 1994. – 212 с.

4 **Штофф, В. А.** Роль моделей в познании [Текст] – Л. : ЛГУ, 1963. – 128 с.

5 **Таубаева, Ш.** Методология и методика дидактического исследования : учебное пособие [Текст]. – Алматы : Казак университети, 2015. – 246 с.

6 **Дахин, А. Н.** Моделирование компетентности участников открытого образования [Текст]. – М. : НИИ школьных технологий 2009. – 290 с.

7 **Дахин, А. Н.** Моделирование в педагогике [Текст] // Идеи и идеалы. – 2010. – № 1(3). – Т. 2 – С. 11–20.

8 **Дахин, А. Н.** Педагогическое моделирование : монография [Текст]. – Новосибирск : Изд-во НИПКиПРО, 2005. – 230 с.

9 **Аубакирова, С. Д.** Формирование деонтологической готовности будущих педагогов к работе в условиях инклюзивного образования : дисс. на соиск. степ. д-ра филос. (PhD) по 6D010300 – Педагогика и психология [Текст] – Павлодар, 2017. – 162 с.

10 **Арын, Е. М., Пфейфер, Н. Э., Бурдина, Е. И.** Теоретические аспекты профессиональной подготовки педагога XXI века : учеб. пособие [Текст]. – Павлодар : ПГУ им. С. Торайгырова; СПб. : ГАФКиС им. П. Ф. Лесгафта, 2005. – 270 с.

**References**

1 **Dahin, A. N.** Pedagogicheskoe modelirovanie : suschnost, effektivnost i neopredelennost [Pedagogical modeling : essence, effectiveness, and uncertainty] [Text]. In Pedagogy. – 2003. – № 4. – P. 22.

2 **Kuznetsova, A. G.** Razvitie metodologii sistemnogo podhoda v otechestvennoi pedagogike [Development of the system approach methodology in Russian pedagogy : monograph] [Text]. – Khabarovsk : Izd-vo KhK IPPK PK, 2001. – 152 p.

3 **Karopa, G. N.** Sistemnyi podhod k ekologicheskomu obrazovaniyu i vospitaniyu (Na materiale selskih shkol) [The systematic approach to environmental education and upbringing (Based on the material of rural schools)] [Text] – Minsk, 1994. – 212 p.

4 **Shtoff, V. A.** Rol modelei v poznanii [The role of models in cognition] [Text] – L. : LGU, 1963. – 128 p.

5 **Taubayeva, Sh.** Metodologiya i metodika didakticheskogo issledovaniya : uchebnoe posobie [Methodology and methods of educational research : a tutorial] [Text] – Almaty : Kazak University, 2015. – 246 p. c.

6 **Dahin, A. N.** Modelirovanie kompetentnosti uchastnikov otkrytogo obrazovaniya [Modeling the competence of open education participants] [Text] – Moscow : NII shkolnyh tehnologii, 2009. – 290 p.

7 **Dahin, A. N.** Modelirovanie v pedagogike [Modeling in pedagogy] [Text]. In Idei i idealy. – 2010. – № 1(3). – Т. 2 – P. 11–20.



8 **Dahin, A. N.** Pedagogicheskoe modelirovanie : monographia [Pedagogical modeling : monograph] [Text]. – Novosibirsk : Izd-vo NIPKiPRO, 2005. – 230 p.

9 **Aubakirova, S. D.** Formirovaniye deontologicheskoi gotovnosti buduschih pedagogov k rabote v usloviyah inklusivnogo obrazovaniya : dissertaciya na soiskanie stepeni doctora filosofii (PhD) po specialnosti 6D010300 – Pedagogika i psihologiya. [Formation of deontological readiness of future teachers to work in inclusive education : dissertation for the degree of doctor of philosophy (PhD) in the specialty 6D010300- Pedagogy and psychology] [Text] – Pavlodar, 2017. – 162 p.

10 **Aryn, E. M., Pfeifer, N. E., Burdina, E. I.** Teoreticheskie aspekty professionalnoi podgotovki pedagoga XXI veka : ucheb. posobie [Theoretical aspects of professional training of a teacher of the XXI century : textbook] [Text] – Pavlodar : PGU im. S. Toraigyrov PSU; St.Petersburg. : GAFKiS im. P. F. Lesgafta, 2005. – 270 p.

*С. К. Антикеева*

Торайғыров университет, Қазақстан Республикасы, Павлодар қ.

### **БІЛІКТІЛІКТІ АРТТЫРУ КУРСТАРЫ АРҚЫЛЫ ӘЛЕУМЕТТІК ҚЫЗМЕТКЕРЛЕРДІҢ ҚҰЗІРЕТТІЛІКТЕРІН ҚАЛЫПТАСТЫРУДЫҢ ТЕОРИЯЛЫҚ МОДЕЛІ**

*Бұл мақалада «Әлеуметтік қызметкерлердің біліктілігін арттыру курстары арқылы тұлғалық және кәсіби құзіреттіліктерін қалыптастыру» докторлық диссертация шеңберінде әзірленген біліктілікті арттыру курстары арқылы әлеуметтік қызметкерлердің тұлғалық және кәсіби құзіреттілігін қалыптастырудың теориялық моделі ұсынылған. Мақалада модельдеу процесінің педагогикалық аспектілері, педагогикалық модельдеудің кезеңдері келтірілген. Модельдің әдіснамалық, процессуалдық (технологиялық) және аспаптық деңгейлері, оның мақсаты, қажетті құзіреттердің қалыптасу мониторингі, сондай-ақ нәтижесі ұсынылған. Модельде құзіреттілікке, тұлғаға бағытталған және практикаға бағытталған педагогикалық тәсілдер, таңдалған құзіреттерді қалыптастыру заңдылықтары, қағидаттары, шарттары көрсетілген; қалыптасу процесін іске асыру кезеңдері, жеке және кәсіби құзіреттердің қалыптасу деңгейлері сипатталған. Практикалық дайындық бөлімінде тыңдаушы-оқытушы-топ жүйесінде интерактивті жұмыс ұсынылады, ол әр маманның жеке қатысуын, сондай-ақ елімізде алғашқы «кәсіби әлеуметтік қызметкерлердің ұлттық альянсы» республикалық қоғамдық бірлестігінің ашылуын білдіреді. Бұл модель*

*әлеуметтік қызметкерлердің жеке және кәсіби құзіреттерін одан әрі жетілдіруді және тәуелсіз дамытуды білдіреді. Бұл модельде біліктілікті арттыру курстарын іске асырудың тиімділігін, жұмыс нысандары, әдістері мен құралдарын көруге мүмкіндік береді.*

*Кілтті сөздер: теориялық модель, құзіреттілік, біліктілікті арттыру, әлеуметтік қызметкерлер.*

*S. K. Antikeeva*

Toraigyrov University, Republic of Kazakhstan, Pavlodar

### **THEORETICAL MODEL OF FORMATION COMPETENCIES OF SOCIAL WORKERS THROUGH PROFESSIONAL DEVELOPMENT COURSES**

*This article presents a theoretical model for the formation of personal and professional competencies of social workers through advanced training courses, which was developed in the framework of the doctoral dissertation «Formation of personal and professional competencies of social workers through advanced training courses». The article presents the pedagogical aspects of the modeling process itself, and lists the stages of pedagogical modeling. The methodological, procedural (technological) and instrumental levels of the model, its purpose, monitoring the formation of the required competencies, as well as the result are presented. The model shows competence-based, personality-oriented and practice-oriented pedagogical approaches, patterns, principles, conditions for the formation of selected competencies; describes the stages of the formation process, the levels of formation of personal and professional competencies. The practical training section offers interactive work in the listener-teacher-group system, which implies the personal participation of each specialist, as well as the opening of the first Republican public Association in our country, the national Alliance of professional social workers. This model implies further improvement and independent development of personal and professional competencies of social workers. This allows you to see in the model the effectiveness of the implementation of advanced training courses, forms, methods and means of work.*

*Keywords: theoretical model, competencies, professional development, social workers.*

## Сведения об авторах

На казахском языке	На русском языке	На английском языке
Антикеева Самал Канатовна «Педагогика және психология» мамандығы бойынша докторант «Торайғыров университеті» КЕАК, Гуманитарлық және әлеуметтік ғылымдар факультеті, Павлодар, 140008, Қазақстан Республикасы, samal_antikeyeva@mail.ru, 8-000-000-00-00	Антикеева Самал Канатовна докторант по специальности «Педагогика и психология» НАО «Торайғыров университет», Факультет гуманитарных и социальных наук, Павлодар, 140008, Республика Казахстан, samal_antikeyeva@mail.ru, 8-000-000-00-00	Samal Kanatovna Antikeyeva doctoral student in «Pedagogy and psychology» «Toraighyrov University» NCJSC, Faculty of Humanities and Social Sciences, Pavlodar, 140008, Republic of Kazakhstan, samal_antikeyeva@mail.ru, 8-000-000-00-00

**ПУБЛИКАЦИОННАЯ ЭТИКА НАУЧНЫХ ЖУРНАЛОВ  
«ВЕСТНИК ТОРАЙГЫРОВ УНИВЕРСИТЕТА»,  
«КРАЕВЕДЕНИЕ», «НАУКА И ТЕХНИКА КАЗАХСТАНА»**

Редакционная коллегия журналов «Вестник Торайғыров университет», «Краеведение» и «Наука и техника Казахстана» в своей работе придерживается международных стандартов по этике научных публикаций и учитывает информационные сайты ведущих международных журналов.

Редакционная коллегия журнала, а также лица, участвующие в издательском процессе в целях обеспечения высокого качества научных публикаций, во избежание недобросовестной практики в публикационной деятельности (использование недостоверных сведений, изготовление данных, плагиат и др.), обеспечения общественного признания научных достижений обязаны соблюдать этические нормы и стандарты, принятые международным сообществом и предпринимать все разумные меры для предотвращения таких нарушений.

Редакционная коллегия ни в коем случае не поощряет неправомерное поведение (плагиат, манипуляция, фальсификация) и приложит все силы для предотвращения наступления подобных случаев. В случае, если редакционной коллегии станет известно о любых неправомерных действиях в отношении опубликованной статьи в журнале или в случае отрицательного результата экспертизы редколлегией статья отклоняется от публикации.

Редакционная коллегия не должна раскрывать информацию о принятых к опубликованию рукописей третьим лицам, не являющимся рецензентами, потенциальными рецензентами, членами редакционной коллегии, работниками типографии. Неопубликованные данные, полученные из рукописей, не должны использоваться в личных исследовательских целях без письменного разрешения автора.

**Ответственность экспертов (рецензентов)**

Рецензенты должны давать объективные суждения и указывать на соответствующие опубликованные работы, которые еще не цитируются. К рецензируемым статьям следует обращаться конфиденциально. Рецензенты будут выбраны таким образом, чтобы не было конфликта интересов в отношении исследования, авторов и / или спонсоров исследования.

**Ответственность авторов**

Ответственность за содержание работы несет автор. Авторы обязаны вносить исправления, пояснения, опровержения и извинения, если такие имеются.

Автор не должен представлять статью, идентичную ранее опубликованной в другом журнале. В частности, не принимаются переводы на английский либо немецкий язык статей, уже опубликованных на другом языке.

В случае обнаружения в рукописи статьи существенных ошибок автор должен сообщить об этом редактору раздела до момента подписи в печать оригинал-макета номера журнала. В противном случае автор должен за свой счет исправить все критические замечания.

Направляя статью в журнал, автор осознаёт указанную степень персональной ответственности, что отражается в письменном обращении в редакционную коллегию Журнала.

Теруге 10.03.2025 ж. жіберілді. Басуға 28.03.2025 ж. қол қойылды.

Электронды баспа

29.9 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 №4358

Сдано в набор 10.03.2025 г. Подписано в печать 28.03.2025 г.

Электронное издание

29.9 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 № 4358

«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