

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

№ 4 (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/10.48081/GMYR4462>

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>
Шокубаева З. Ж.	<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

© Торайғыров университет

МАЗМҰНЫ
СОДЕРЖАНИЕ
CONTENT

Айкимбаева Д. Д., Таткеева Г. Г.

Оптимизация систем накопления энергии для солнечных
электростанций на основе натрий-ионных аккумуляторов6

Байжұма Ж. Е., Қаласов Н. Б., Ильясова Г. О.

Қалдық жылуды тиімді пайдалану үшін жылу
алмастырғышты CFD арқылы талдау24

Batyrbek A. Y., Sivyakova G. A., Tytiuk V. K.

Modeling the electromechanical system
of drum flying shears using Lagrange equations.....43

Бердібеков А. О., Бекбаев А. Б., Смагулова К. К.,

Жуматова А. А., Бекболатова Ж. Қ.

Цифрлы диагностика негізінде микрогидро электр станциясындағы
синхронды генератордың жұмысын оңтайландыру61

Досанова А. Т., Исатаев М. С., Онгар Б., Дүйсенбек Ж. С.

Жоғары критикалық бу генераторларының
термодинамикалық циклдерін оңтайландыру78

Достияров А. М., Сапарғалиева А. Н.,

Туманов М. Е., Катранова Г. С.

Жылу генераторындағы микрожалынды алдыңғы құрылғының
ауа саптамалары қалағының айналуының әсері93

Есимова Д. Д., Белый А. В., Фаурат А. А.,

Есім А. Қ., Джанарғалиева М. Р.

Оценка и рекомендации по снижению энергетически
обусловленных выбросов CO₂ в региональном туризме108

Жалмағамбетова У. К., Ташлыкова Р. В., Ларкин В. А.

Возможности создания программного обеспечения для
гидравлического и теплового расчётов систем теплоснабжения125

Иманев М. Ш., Сафарбаков А. А., Олейник С. И.

Повышение надежности теплоснабжения в условиях
повышенного износа тепловых сетей135

Исабеков Ж. Б., Исабекова Б. Б., Жантлесова А. Б.,

Есмаханова Л. Н., Сағындық Ә. Б.

Потери электроэнергии в сетях Казахстана:
причины, последствия и пути их снижения.....146

Исабеков Д. Д., Жуматаев Н. Ш., Марковский В. П.,

Тозлу А., Жумажанов С. К.

Электр қондырғыларының альтернативтік ресурс
үнемдейтін доғалық қорғанысы.....158

Исаев В. Л., Калытка В. А., Камарова С. Н., Нешина Е. Г. Моделирование состава угольных смесей с учётом обобщённого графика теплопотребления	168
Исенов С. С., Байбейсенова Қ. Б., Нұрмағанбетова Г. С. Шағын елді мекендердің энергиямен жабдықтау тиімділігі: гибриді жел-күн қондырғылары	188
Канапинов М. С., Байдилдина А. Т., Дуйсембаева Г. С., Агажанов А. Ш., Самошкин Д. А. Inconel 617 қорытпасының жылуөткізгіштігін және температураөткізгіштігін зерттеу	207
Карманов А. Е., Никифоров А. С., Тулебаева Ж. А., Габдулов А. У., Арипова Н. М. Анализ сжигания угольных отходов с минимизацией выбросов вредных веществ	219
Кулакаева А. Е., Медетов Б. Ж., Дайнеко Е. А., Айтмағамбетов А. З., Кожаметова Б. А. Повышение эффективности приема радиосигналов в спутниковых системах радиомониторинга	228
Кушанова Д. К., Айткалиева Г. С., Елубай М. А., Исмаилова А. Б. Инструменты линейного программирования для стратегического развития нефтепереработки и нефтехимии в Казахстане	243
Құлтан И. Б., Алихан Ұ. Б., Жансерікқызы А., Торғаев Т. С., Құдайбергелі З. Р. Биогазды анаэробтық ашыту арқылы түскен жапырақтардан алу	257
Машрапова Р. М., Барукин А. С., Машрапов Б. Е., Динмуханбетова А. Ж. Выбор магнитного экрана для построения защиты комплектного токопровода на основе катушек индуктивности	269
Меирбекова О. Д., Бергузинов А. Н., Калтаев А. Г. Қосалқы станция жабдықтарын диагностикалаудың заманауи әдістерінің тиімділігін бағалау	279
Молдахметов С. С., Анарбаев А. Е., Кислов А. П. Абдрахманов Б. Т., Аябаев А. С. Генератор преднамеренных электромагнитных помех на основе искрового разрядника	298
Мұзапаров Д. Т., Талипов О. М. Модификацияланған беттерде қайнаған кезде жылу алмасуды күшейтудің заманауи әдістері	311
Расмухаметова А. С., Олжабаева К. С., Қазыбек Ж. Г., Нұрғали А. Е., Нұрқасен Н. А. Күн панельдерінің сипаттамаларын зерттеу	327
Sarsikeev E. J., Mehdiyev A. D., Mehdiyev R. A., Kuatova A. S., Shaimerdenova R. T. Design and calculation of a linear reciprocating generator for thermoacoustic engine	340

Сейтжаппаров Н. К., Мерғалимова А. К., Атықшева А. В., Ыбрай С. Б., Бекишева Ж. Т. Рациональные режимы пиролиза казахстанских углей и их применение в посёлковых энергосистемах	354
Тасболат Ф. Ж., Султангузин И. А., Алимгазин А. Ш., Цэрэндорж Ц., Сулейменов К. Б. Жаңартылған энергия көздерін пайдаланатын, жылу оқшаулауы бар энергия белсенді үй	367
Таштай Е., Сәбиболда Ә. М., Нусупов Е., Наубетов Д. А., Смайлов Н. Қ. Волоконды-оптикалық гироскоптардың сипаттамаларын зерттеу және навигациялық жүйелердегі тиімділігін арттыру	387
Умышева М. М., Сарсенбаев Е. А., Умышев Д. Р. Анализ пусковых операций парогазовых установок	398
Авторлар туралы ақпарат Сведения об авторах Information about the authors	413
Авторларға арналған ережелер Правила для авторов Rules for authors	448
Жарияланым этикасы Публикационная этика Publication ethics	460

<https://doi.org/10.48081/LKRT3596>

***Д. Д. Айқимбаева¹, Г. Г. Таткеева²**

¹ГКП на ПХВ «Высший колледж транспорта и коммуникаций»,
Республика Казахстан, г. Астана;

²Казахский агротехнический исследовательский
университет имени С. Сейфуллина, Республика Казахстан, г. Астана.

¹ORCID: <https://orcid.org/0009-0005-6182-9220>

²ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-9518-4567>

*e-mail: darkhan_s05@mail.ru

ОПТИМИЗАЦИЯ СИСТЕМ НАКОПЛЕНИЯ ЭНЕРГИИ ДЛЯ СОЛНЕЧНЫХ ЭЛЕКТРОСТАНЦИЙ НА ОСНОВЕ НАТРИЙ-ИОННЫХ АККУМУЛЯТОРОВ

Актуальность исследования обусловлена необходимостью повышения стабильности и эффективности функционирования солнечных электростанций в условиях неравномерной генерации электроэнергии. В современных энергетических системах, ориентированных на декарбонизацию и расширение доли возобновляемых источников энергии, возрастает значение интеграции накопителей, способных сглаживать суточные и сезонные колебания выработки. В этом контексте натрий-ионные аккумуляторы рассматриваются как экономически и технологически перспективная альтернатива традиционным литий-ионным системам, особенно с точки зрения снижения зависимости от дефицитных ресурсов.

Целью статьи является разработка научно обоснованных подходов к оптимизации архитектуры и режимов функционирования систем накопления энергии с использованием натрий-ионных аккумуляторов, с акцентом на повышение их надёжности и адаптивности к параметрам фотоэлектрической генерации.

В рамках методологии проведён теоретический анализ научных источников, технико-эксплуатационных характеристик аккумуляторных блоков, моделей прогнозирования и управления зарядно-разрядными циклами, а также параметров энергообмена в гибридных установках. Используются сравнительно-аналитические

методы, методы системного подхода, а также обобщение передовых инженерных решений.

Научная новизна заключается в систематизации критериев выбора и конфигурации натрий-ионных накопителей для солнечных электростанций, а также в разработке рекомендаций по их адаптации к динамическим условиям генерации и потребления.

В результате исследования выявлены ключевые технологические, экономические и инфраструктурные барьеры внедрения данных систем; установлено, что наиболее эффективными являются модульные конфигурации с интеллектуальными системами управления и прогнозирования. Доказано, что применение адаптивных моделей управления на основе машинного обучения повышает энергетическую автономность и рентабельность солнечных установок.

К перспективным направлениям отнесено развитие гибридных архитектур накопителей, создание цифровых двойников для оптимизации эксплуатационных режимов, а также стандартизация решений на уровне промышленных и децентрализованных энергосистем.

Ключевые слова: энергетическая устойчивость, прогнозное управление, модульные аккумуляторы, адаптивные режимы, фотоэлектрическая генерация

Введение

Современное развитие возобновляемой энергетики обусловлено необходимостью декарбонизации экономики и повышения энергетической независимости, что особенно актуально на фоне роста мирового энергопотребления и нестабильности топливных рынков. Солнечные электростанции, как один из ключевых источников чистой энергии, стремительно интегрируются в национальные энергетические балансы, однако их широкомасштабное применение сопровождается проблемой нестабильности выработки и несоответствия между генерацией и потреблением электроэнергии. Эффективное функционирование таких систем невозможно без надежных накопителей энергии, способных сглаживать колебания выработки и обеспечивать стабильность энергоснабжения. В этом контексте особое внимание уделяется разработке и оптимизации систем хранения энергии, в частности на основе натрий-ионных аккумуляторов, как более устойчивой и потенциально дешёвой альтернативы литий-ионным аналогам.

Несмотря на значительный прогресс в области хранения энергии, существующие решения часто не учитывают специфику работы в условиях переменной генерации и требуют адаптации к техническим и экономическим

особенностям солнечных электростанций различного масштаба. Проблема заключается не только в выборе подходящего типа аккумуляторов, но и в необходимости системного подхода к оптимизации их параметров, конфигураций и режимов эксплуатации. Это делает актуальным проведение научных исследований, направленных на создание интеллектуальных моделей управления и прогнозирования работы натрий-ионных систем в составе солнечных энергетических установок, с учетом факторов производительности, стоимости, надежности и экологической устойчивости.

Несмотря на растущий интерес к натрий-ионным аккумуляторам, их эксплуатационные характеристики в составе солнечных электростанций до сих пор изучены недостаточно. Остаются открытыми вопросы работы в условиях переменной генерации, включая допустимую глубину разряда, устойчивость к температурным колебаниям и эффективность в различных режимах нагрузки. Недостаточно разработаны модели адаптивного управления, способные учитывать особенности натрий-ионной химии и динамику солнечной инсоляции.

Кроме того, отсутствуют универсальные критерии конфигурации аккумуляторных блоков с учетом параметров генерации и потребления, что затрудняет масштабирование систем. Не решены проблемы совместимости с существующими BMS и инверторами, а также нормативные и логистические ограничения. Предлагаемое исследование направлено на восполнение этих пробелов за счет систематизации эксплуатационных параметров, разработки структурированных подходов к выбору конфигурации и внедрения прогнозных моделей управления с учетом технических и климатических условий.

Анализ научных исследований по теме оптимизации систем накопления энергии для солнечных электростанций на основе натрий-ионных аккумуляторов позволяет выделить четыре ключевых направления, формирующих современную научную парадигму в данной области.

Первое направление связано с сравнительным анализом натрий-ионных и литий-ионных технологий с точки зрения их применимости в системах с возобновляемыми источниками энергии. H. Bai и Z. Song провели комплексное исследование трёх типов аккумуляторов – литий-ионных, натрий-ионных и редокс-флоу – в контексте их эффективности в возобновляемой энергетике [1]. J. Hounjet оценила применимость натрий-ионных батарей в системах накопления энергии, обращая внимание на технические параметры, безопасность и стоимость [2]. A. J. Casey и M. D'Arpino рассмотрели сравнительную производительность литий- и натрий-ионных аккумуляторов в прикладных энергетических системах, включая фотоэлектрические установки [3]. Эти исследования подчеркивают перспективность натриевых технологий для солнечной энергетики, однако указывают на необходимость повышения их

энергетической плотности и устойчивости к циклированию. Целесообразно дополнить это направление исследованиями полного жизненного цикла и углеродного следа натрий-ионных аккумуляторов по сравнению с альтернативными накопителями.

Второе направление касается инженерных и материаловедческих стратегий оптимизации натрий-ионных аккумуляторов с учетом нестабильной генерации солнечных электростанций. J. Chen и соавт. представили комплексный обзор ключевых факторов, влияющих на функциональность батарей, включая выбор катодов, анодов, электролитов и конструкцию ячеек [4]. H. S. Hirsh и коллеги исследовали потенциал натрий-ионных аккумуляторов для длительного хранения энергии в масштабах электросетей [5]. W. Yang и соавт. сосредоточились на усовершенствовании полианионных катодных материалов с высокой стабильностью и емкостью [6]. H. Xu с коллегами систематизировали подходы к оптимизации катодов с точки зрения плотности энергии, циклической стабильности и масштабируемости [7]. Y. Yang и соавт. предложили стратегии повышения начального кулоновского выхода анодов из твердого углерода – ключевого компонента для коммерциализации технологии [8].

В рамках данного направления необходимо углубить экспериментальные исследования поведения материалов при колебательном режиме генерации и интенсивной циклизации.

Третье направление охватывает оптимизацию конфигурации аккумуляторных систем и их экономической эффективности при интеграции с солнечными установками. M. T. Castro и соавт. разработали комбинированную модель, учитывающую физические и стоимостные параметры для оптимизации характеристик натрий-ионных батарейных блоков [9]. D. Dewar и A. Glushenkov исследовали возможность преднасыщения натрием (pre-sodiation) как способ повышения энергоёмкости и снижения потерь при первом цикле заряда [10]. R. Wahyu с соавторами провели инженерный анализ применимости натрий-ионных аккумуляторов в качестве альтернативы литиевым, особенно в условиях повышенной температуры и влажности [11]. A. Alzahrani и коллеги предложили стратегию многокритериальной оптимизации в интеллектуальных энергосетях, учитывающую взаимодействие между генерацией, нагрузкой и параметрами накопителей [12]. Перспективным направлением станет интеграция подобных моделей с прогнозными алгоритмами управления солнечной генерацией в реальном времени.

Четвертое направление фокусируется на вопросах безопасности, надежности и нормативной совместимости натрий-ионных систем при их масштабном внедрении. A. Iwan и соавт. изучили инженерные аспекты

безопасности таких аккумуляторов в военных системах хранения, акцентируя внимание на устойчивости к ударам, термостабильности и отказоустойчивости [13]. X. Chang и соавт. предложили использование негорючих органических жидких электролитов как основу для построения безопасных крупномасштабных систем [14]. С. Delmas обобщил 50-летнюю историю исследований в области натриевых батарей, указав на ключевые вызовы, связанные с стандартизацией и интеграцией технологий в энергетическую инфраструктуру [15]. Целесообразно сосредоточить усилия на разработке международных технических стандартов и регламентов безопасности для применения натрий-ионных систем на объектах критической энергетики.

Выделенные направления демонстрируют, что натрий-ионные аккумуляторы обладают высоким потенциалом для эффективного применения в солнечной энергетике. Однако их широкомасштабное внедрение требует междисциплинарного подхода к технической, экономической и регуляторной оптимизации.

Цель статьи – разработать научно обоснованные подходы к оптимизации систем накопления энергии на основе натрий-ионных аккумуляторов для повышения эффективности и устойчивости работы солнечных электростанций в условиях переменной генерации.

Задачи статьи:

1 Охарактеризовать технические и эксплуатационные особенности натрий-ионных аккумуляторов и обосновать критерии их конфигурации с учётом параметров генерации, хранения и потребления электроэнергии в солнечных энергетических установках.

2 Проанализировать существующие модели управления и прогнозирования работы систем накопления энергии при интеграции с фотоэлектрическими установками, а также выявить ключевые ограничения, препятствующие эффективному внедрению натрий-ионных аккумуляторов.

3 Сформулировать научно обоснованные рекомендации по оптимизации архитектуры накопительных систем и режимов их работы на основе натрий-ионных аккумуляторов с целью повышения надёжности и энергоэффективности солнечных электростанций.

Материалы и методы

В ходе исследования использован теоретический анализ научных и технических источников, посвящённых накопителям энергии, фотоэлектрическим системам и натрий-ионным аккумуляторам. Анализ подвергнуты технические и эксплуатационные характеристики аккумуляторных блоков, включая их химический состав, энергетическую плотность, температурные режимы и число циклов заряд-разряд.

Рассмотрены возможности применения натрий-ионных систем в различных климатических и эксплуатационных условиях.

Для оценки эффективности интеграции аккумуляторов в солнечные электростанции использованы сравнительно-аналитические методы. Проведено сопоставление существующих моделей управления и прогнозирования (в том числе на базе временных рядов и машинного обучения), а также рассмотрены примеры их внедрения в реальных проектах в разных странах. Обобщён практический опыт использования аккумуляторов в автономных и гибридных энергетических системах. Отдельное внимание уделено анализу архитектурных решений, позволяющих обеспечить модульность, масштабируемость и надёжность работы накопителей в условиях переменной генерации.

Результаты и обсуждение

Натрий-ионные аккумуляторы представляют собой перспективное направление развития накопителей энергии благодаря своей ресурсоемкости, относительной дешевизне и экологической безопасности. В отличие от литий-ионных аналогов, они используют более доступные и равномерно распределённые в земной коре материалы, такие как натрий и алюминий, что снижает себестоимость и уменьшает геополитическую зависимость. Эти аккумуляторы характеризуются высокой термической стабильностью, способностью работать в широком температурном диапазоне и безопасностью при механических повреждениях, что особенно важно для удалённых и климатически нестабильных регионов. Однако существуют и определённые ограничения, включая более низкую удельную энергию по сравнению с литиевыми системами, что требует грамотного подхода к проектированию и компоновке накопительных блоков. При этом именно в солнечной энергетике, где стоимость играет ключевую роль, натрий-ионные технологии могут обеспечить выгодное соотношение цена–эффективность, особенно при масштабировании (табл.1).

Таблица 1 – Сравнительная характеристика натрий-ионных аккумуляторов в контексте применения в солнечных энергетических системах

Характеристика	Содержание	Практическое значение для солнечной энергетики
Химический состав	NaFePO_4 , $\text{Na}_3\text{V}_2(\text{PO}_4)_3$, $\text{NaTi}_2(\text{PO}_4)_3$, твердый электролит, карбоновые аноды	Упрощает производство, снижает себестоимость
Энергетическая плотность	90–150 Вт·ч/кг	Меньше, чем у литиевых систем, требует увеличения объема накопителей

Рабочий температурный диапазон	от -20 до +60 °С	Повышает устойчивость в различных и экстремальных условиях эксплуатации
Количество циклов заряд-разряд	2000-4000	Соизмеримо с литиевыми системами, подходит для длительного использования
Экологичность и уровень безопасности	Высокая, не склонны к возгоранию, нетоксичны	Повышает надёжность и снижает затраты на защитные системы
Зависимость от критических металлов	Отсутствует потребность в литии, кобальте, никеле	Повышает устойчивость поставок и снижает цену
Совместимость с солнечными инверторами	Возможна при соответствующей настройке контроллеров и BMS	Не требует полной замены инфраструктуры
Стоимость по сравнению с литиевыми системами	Ниже на 20-30% при массовом производстве	Повышает инвестиционную привлекательность в сфере ВИЭ

Источник: составлено автором по материалам [1; 2; 4; 5; 6; 13; 14]

На практике применение натрий-ионных аккумуляторов в солнечной энергетике становится особенно актуальным в условиях децентрализованных систем энергоснабжения, таких как автономные станции, сельские микросети и резервные комплексы в удалённых районах. Их способность выдерживать перепады температур и сниженная чувствительность к перегрузкам делают их устойчивыми к нестабильной генерации, типичной для солнечных установок. Кроме того, невысокая себестоимость и доступность сырья позволяют рассматривать натрий-ионные накопители как экономически целесообразную альтернативу в проектах, где литиевые решения оказываются слишком дорогими или нестабильными с точки зрения поставок. Современные прототипы и первые коммерческие реализации таких систем показывают, что при правильной конфигурации и управлении натрий-ионные батареи обеспечивают приемлемую плотность хранения, высокую циклическую стабильность и минимальные затраты на обслуживание, что делает их жизнеспособным элементом будущих энергетических архитектур на основе возобновляемых источников энергии.

Интеграция систем накопления энергии с фотоэлектрическими установками требует использования эффективных моделей управления и прогнозирования, которые позволяют компенсировать нестабильность солнечной генерации и обеспечить баланс между выработкой, хранением и потреблением электроэнергии. В отличие от традиционных энергосистем, где управление строится на стабильных и прогнозируемых источниках, фотоэлектрические станции зависят от метеословий, что делает необходимым внедрение интеллектуальных стратегий на основе анализа больших данных,

моделей машинного обучения и прогностических алгоритмов. Управление накопителями энергии в таких системах должно учитывать не только текущее состояние батарей и потребления, но и краткосрочные и среднесрочные прогнозы солнечной инсоляции, а также состояние сети. Используемые модели могут быть централизованными или децентрализованными, работать в реальном времени и опираться на принципы оптимизации с множеством переменных, включая стоимость энергии, срок службы аккумуляторов и потребительский профиль нагрузки (табл.2).

Таблица 2 – Основные модели управления и прогнозирования работы накопителей энергии при интеграции с солнечными установками

Модель или подход	Краткая характеристика	Роль в управлении накопителями
Модель прогнозирования на основе временных рядов (ARIMA, SARIMA)	Использует исторические данные генерации и нагрузки для построения предсказаний	Позволяет определять пиковые часы и заранее планировать заряд/разряд
Машинное обучение (градиентный бустинг, нейросети, SVM)	Обрабатывает многопараметрические данные: метеословия, поведение потребителей	Обеспечивает адаптивное управление и более точное прогнозирование генерации и спроса
MPC (Model Predictive Control)	Прогнозирует будущее состояние системы и оптимизирует действия на заданном горизонте	Используется для динамической корректировки зарядных циклов с учетом ограничений BMS
Алгоритмы максимизации собственного потребления (Self-Consumption Maximization)	Приоритизируют использование собственной генерации вместо сетевой энергии	Снижают нагрузку на сеть и повышают рентабельность автономной работы
Гибридные модели с учетом стоимости электроэнергии (Time-of-Use + AI)	Сочетают прогноз спроса и ценовые сигналы для оптимального планирования	Позволяют экономически выгодно заряжать/разряжать аккумуляторы в зависимости от тарифа

Источник: составлено автором по материалам [9; 10; 12]

В практических условиях внедрение моделей управления и прогнозирования в системах с фотоэлектрическими установками и накопителями энергии демонстрирует высокую эффективность при условии адаптации к конкретным эксплуатационным параметрам. Так, модели на основе ARIMA применяются для краткосрочного планирования в домашних энергетических системах, позволяя предсказать профили генерации в течение суток и тем самым минимизировать избыточный заряд или разряд аккумулятора [10]. Примеры их использования зафиксированы в проектах распределённых энергосетей в Германии и Японии. В свою очередь,

нейросетевые модели, включая LSTM и глубокие сверточные архитектуры, успешно используются в китайских промышленных микросетях для динамического прогнозирования пиков потребления и управления батарейными фермами [11]. Модель предиктивного управления (MPC) внедрена в пилотных проектах в Нидерландах и США для координации действия батарей, солнечных панелей и интеллектуальных инверторов в режиме реального времени, с учетом технических ограничений и экономических предпочтений [4]. Алгоритмы максимизации собственного потребления получили широкое распространение в странах ЕС, особенно в аграрных домохозяйствах, где важно использовать всю выработанную энергию без отдачи в сеть. Гибридные модели, учитывающие динамику рыночных цен (Time-of-Use) и прогностические данные, доказали свою рентабельность в Израиле и Канаде, где используется адаптивное зарядное планирование в зависимости от колебаний тарифа [4]. Таким образом, применение таких моделей позволяет существенно увеличить автономность систем, снизить операционные издержки и продлить срок службы аккумуляторов.

Рациональный выбор и конфигурация натрий-ионных аккумуляторных блоков для фотоэлектрических установок требует учета комплекса технических, экономических и эксплуатационных параметров. В отличие от универсальных решений, накопители, интегрированные в солнечные энергосистемы, должны быть адаптированы к характеру генерации, суточной и сезонной неравномерности, а также к профилю потребления. Важным является достижение баланса между объемом хранимой энергии, допустимой глубиной разряда, числом циклов и эффективностью зарядно-разрядных процессов. При этом натрий-ионные технологии, обладая ограниченной удельной энергоемкостью, требуют более точного расчета конфигурации аккумуляторных блоков для обеспечения требуемой мощности и длительности автономной работы без существенного увеличения габаритов системы. Кроме того, при проектировании необходимо учитывать такие факторы, как плотность потерь при преобразовании энергии, совместимость с инвертором, температурный режим и целевая нагрузка (табл. 3).

Таблица 3 – Критерии выбора и конфигурации натрий-ионных аккумуляторных блоков в солнечных энергетических установках

Критерий	Содержание	Практическое значение для конфигурации системы
Суточный объем генерации	Средний и пиковый выход солнечной энергии, Вт·ч в сутки	Определяет необходимую емкость аккумуляторного блока

Профиль потребления	Характер нагрузки: постоянная/переменная, вечерние пики, ночное потребление	Влияет на режим разряда и время хранения энергии
Глубина разряда (DoD)	Допустимая глубина использования емкости без ускоренного износа, обычно до 80 %	Обеспечивает долговечность при циклическом использовании
Номинальное напряжение и ток	Зависит от конфигурации панели и инвертора	Требует согласования с BMS и силовой частью системы
Температурные условия эксплуатации	Минимальные и максимальные температуры на месте установки	Определяет необходимость дополнительного охлаждения/изоляции
КПД при зарядке и разряде	Обычно 85–90 % у натрий-ионных систем	Влияет на общий энергетический баланс и экономическую эффективность
Количество циклов и срок службы	2000–4000 циклов, до 10 лет	Определяет расчёт окупаемости и частоту замены
Модульность и масштабируемость	Возможность конфигурации по типу 48 В/96 В с последовательным и параллельным соединением	Облегчает подбор под требуемую мощность и резервирование

Источник: составлено автором по материалам [4; 5; 6; 7; 8; 11]

На практике конфигурация натрий-ионных аккумуляторных блоков осуществляется с учетом анализа метеоданных, мощности фотоэлектрической установки и нагрузки, которую необходимо покрыть в автономном или гибридном режиме. Например, в проектах автономных станций для сельских районов Индии и Южной Африки используются блоки емкостью от 10 до 40 кВт·ч, рассчитанные на покрытие вечернего и ночного потребления при генерации в пиковые дневные часы [4]. Системы конфигурируются так, чтобы использовать до 70–80 % емкости (DoD), обеспечивая тем самым до восьми часов автономной работы без превышения критического износа [8]. В более холодных регионах (например, север Европы) применяются термоизолированные корпуса с адаптацией под минусовые температуры, а в коммерческих установках - масштабируемые блоки, позволяющие объединять от 5 до 20 модулей по 5 кВт·ч [5]. Таким образом, учет критериев выбора и конфигурации позволяет обеспечить оптимальное соотношение между производительностью, долговечностью и стоимостью систем хранения на основе натрий-ионных аккумуляторов.

Несмотря на значительный научный и промышленный интерес к натрий-ионным аккумуляторам как перспективной альтернативе

литий-ионным системам, их широкомасштабное внедрение в контексте солнечных электростанций сдерживается рядом системных проблем. На технологическом уровне основным барьером остается ограниченная удельная энергоемкость, которая существенно уступает литий-ионным аналогам и требует увеличения физического объема батарей для достижения эквивалентной емкости [1]; [5]. Это ограничивает возможности применения натрий-ионных накопителей в условиях ограниченного пространства, например в городских установках или мобильных энергетических модулях. Кроме того, разработка стабильных и долговечных катодных и анодных материалов, совместимых с натриевой химией, по-прежнему остается предметом интенсивных исследований, поскольку многие соединения демонстрируют деградацию при многократных циклах [4].

Экономические барьеры обусловлены отсутствием масштабного производства и серийных поставок, что делает натрий-ионные системы дороже в расчете на киловатт-час при низких объемах заказа [11]. Стоимость может быть снижена только при достижении эффекта масштаба, однако для этого необходимо стабильное рыночное доверие и инфраструктурная поддержка [1]. Кроме того, отсутствует устоявшийся рынок вторичного сырья и сервисного обслуживания, что делает жизненный цикл таких систем менее предсказуемым с точки зрения утилизации и технического сопровождения [13].

Инфраструктурные ограничения также включают недостаточную совместимость с существующими стандартами BMS, инверторов и энергетических контроллеров, что требует адаптации программного обеспечения и технической базы под специфические параметры натрий-ионной технологии [2]; [4]. В некоторых странах препятствием также является нормативная неопределенность, поскольку сертификация таких решений в ряде юрисдикций до сих пор не стандартизирована [15].

Анализ существующих научных исследований подтверждает наличие указанных проблем и позволяет очертить их влияние на реализацию натрий-ионных решений в солнечной энергетике. В первую очередь, ограниченная удельная энергоемкость требует увеличения габаритов батарей, что делает их менее пригодными для компактных фотоэлектрических установок и транспортируемых систем [1];[5];[11]. Ряд авторов подчеркивает, что при текущем уровне технологии эффективность таких решений уступает литиевым, особенно в проектах, где критично использование пространства [3].

Наряду с этим, устойчивость катодных и анодных материалов к повторным циклам заряда и разряда остаётся ограниченной. Исследования демонстрируют, что даже многообещающие структуры на основе твёрдого углерода и фосфатных соединений нуждаются в доработке для повышения начального кулоновского выхода и предотвращения быстрой деградации [4];[6];[7;8].

Экономическая эффективность натрий-ионных батарей также подвергается сомнению на начальном этапе коммерциализации. Отсутствие серийного производства, развитой логистики и инфраструктуры утилизации повышает стоимость одного кВт·ч накопленной энергии [9], [12]. Даже несмотря на дешевизну натрия как сырья, в условиях ограниченного выпуска себестоимость остаётся высокой [1];[10];[15].

Проблемы инфраструктурной совместимости с оборудованием, ориентированным на литий-ионные стандарты, зафиксированы в исследованиях, посвящённых взаимодействию натрий-ионных аккумуляторов с BMS, инверторами и силовыми преобразователями [2];[13]. В частности, адаптация программного обеспечения и согласование рабочих параметров требуют дополнительных усилий. Отдельно акцентируется нормативная неустойчивость в ряде стран, где сертификационные процедуры для подобных решений до сих пор отсутствуют [14].

Тем не менее, перспективные исследования предлагают решения, включающие гибкую модульную архитектуру накопительных систем, прогнозно-адаптивные алгоритмы управления зарядом, использование BMS с динамической регулировкой DoD и интеграцию с метеоаналитикой. Это позволяет снизить пиковые нагрузки, увеличить срок службы аккумуляторов и повысить уровень автономного энергопотребления [4];[7];[10].

Для повышения надежности и энергоэффективности солнечных электростанций на базе натрий-ионных аккумуляторов целесообразно использовать гибкую архитектуру накопительных систем с возможностью модульного масштабирования, что позволяет адаптировать объем хранения к сезонным и суточным колебаниям генерации. Оптимизация должна основываться на предварительном энергетическом аудите станции с учетом профиля потребления и инсоляционных характеристик региона. Рекомендуется внедрение интеллектуальных систем управления (BMS), поддерживающих адаптивные режимы заряд-разряд с динамическим ограничением глубины разряда (DoD), что обеспечивает продление срока службы батарей и предотвращает перегрузку при пиковых нагрузках. Эффективным является применение прогностических алгоритмов, основанных на машинном обучении, для управления зарядом в зависимости от метеопрогнозов и тарифных сигналов, что повышает уровень собственного потребления и снижает зависимость от внешней сети. При проектировании систем хранения необходимо предусматривать резервные модули, обеспечивающие отказоустойчивость и упрощающее сервисное обслуживание. Также рекомендуется использовать энергоэффективные преобразователи с высоким коэффициентом полезного действия и

согласованные интерфейсы, что минимизирует потери при передаче энергии между фотоэлектрическими модулями, аккумуляторами и нагрузкой.

Выводы

Проведённое исследование позволило обосновать целесообразность использования натрий-ионных аккумуляторов в системах накопления энергии для солнечных электростанций, учитывая их технологические преимущества, доступность сырьевой базы и адаптивность к условиям переменной генерации. Установлено, что несмотря на сравнительно низкую удельную энергию, данные системы обладают высокой термической стабильностью, экологической безопасностью и экономической привлекательностью при масштабном производстве. Научный анализ подтвердил, что эффективная интеграция таких накопителей в фотоэлектрические установки требует применения интеллектуальных моделей управления и прогнозирования, которые способны учитывать не только метеоусловия, но и динамику потребления и тарифные сигналы.

Выявлены ключевые проблемы, препятствующие широкомасштабному внедрению натрий-ионных решений, включая ограниченность доступных промышленных конфигураций, отсутствие единых стандартов и необходимость адаптации инфраструктуры управления. Наиболее значимыми остаются барьеры, связанные с технологической зрелостью материалов и отсутствием развитого рынка сервисного обслуживания.

На основании комплексного анализа предложены научно обоснованные рекомендации по архитектурной и функциональной оптимизации таких накопительных систем, включая модульное масштабирование, использование прогностических алгоритмов, температурную адаптацию и повышение КПД преобразователей. Перспективы дальнейших исследований связаны с разработкой гибридных систем на основе натрий-ионных и других аккумуляторных технологий, адаптацией к сетям переменной частоты и внедрением цифровых двойников для мониторинга и предиктивной диагностики накопителей в составе солнечных электростанций.

REFERENCES

1 **Bai, H., Song, Z.** Lithium-ion battery, sodium-ion battery, or redox-flow battery : A comprehensive comparison in renewable energy systems // *Journal of Power Sources*. 2023. Vol. 580. – P. 233–426. – <https://doi.org/10.1016/j.jpowsour.2023.233426>

2 **Hounjet, L. J.** Comparing lithium- and sodium-ion batteries for their applicability within energy storage systems // *Energy Storage*. – 2022. – Vol. 4. – № 3. – P. e309. – <https://doi.org/10.1002/est2.309>

3 **Casey, A. J., D'Arpino, M.** Performance of Sodium-Ion and Lithium-Ion Batteries for Energy Storage System Applications // *Proc. of the 2025 IEEE Electrical Energy Storage Applications and Technologies Conference (EESAT)*. Charlotte, NC, USA. IEEE. – 2025. – P. 1–5. – <https://doi.org/10.1109/EESAT62935.2025.10891240>

4 **Chen, J., Adit, G., Li, L., Zhang, Y., Chua, D. H., Lee, P. S.** Optimization strategies toward functional sodium-ion batteries // *Energy & Environmental Materials*. 2023. – Vol. 6. – № 4. – P. e12633. – <https://doi.org/10.1002/eem2.12633>

5 **Hirsh, H. S., Li, Y., Tan, D. H., Zhang, M., Zhao, E., Meng, Y. S.** Sodium-ion batteries paving the way for grid energy storage // *Advanced Energy Materials*. 2020. – Vol. 10. – № 32. – P. 2001274. – <https://doi.org/10.1002/aenm.202001274>

6 **Yang, W., Liu, Q., Zhao, Y., Mu, D., Tan, G., Gao, H., Li, L., Chen, R., Wu, F.** Progress on Fe-based polyanionic oxide cathodes materials toward grid-scale energy storage for sodium-ion batteries // *Small Methods*. – 2022. – Vol. 6. – № 9. – P. 2200555. – <https://doi.org/10.1002/smt.202200555>

7 **Xu, H., Yan, Q., Yao, W., Lee, C.-S., Tang, Y.** Mainstream optimization strategies for cathode materials of sodium-ion batteries // *Small Structures*. – 2022. – Vol. 3. – № 4. – P. 2100217. – <https://doi.org/10.1002/ssr.202100217>

8 **Yang, Y., Wu, C., He, X.-X., Zhao, J., Yang, Z., Li, L., Wu, X., Li, L., Chou, S. L.** Boosting the development of hard carbon for sodium-ion batteries: strategies to optimize the initial coulombic efficiency // *Advanced Functional Materials*. – 2024. – Vol. 34. – № 5. – P. 2302277. – <https://doi.org/10.1002/adfm.202302277>

9 **Castro, M. T., Domalanta, M. R. B., Paraggua, J. A. D., Ocon, J. D.** Energy, power, and cost optimization of a sodium-ion battery pack via a combined physics-based and cost modeling approach // *Journal of Energy Storage*. – 2024. – Vol. 94. – P. 112414. – <https://doi.org/10.1016/j.est.2024.112414>

10 **Dewar, D., Glushenkov, A. M.** Optimisation of sodium-based energy storage cells using pre-sodiation: a perspective on the emerging field // *Energy & Environmental Science*. – 2021. – Vol. 14. – № 3. – P. 1380–1401. – <https://doi.org/10.1039/D0EE02782K>

11 **Wahyu, R., Syahputra, H., Kammuang-lue, N., Sakulchangsattajai, P., Chaichana, C., Shankar, V. U., Suttakul, P., Yuttana, M.** Engineering aspects of sodium-ion battery: an alternative energy device for Lithium-ion batteries // *Journal of Energy Storage*. – 2024. – Vol. 100. – P. 113497. – <https://doi.org/10.1016/j.est.2024.113497>

12 Alzahrani, A., Ur Rahman, M., Hafeez, G., Rukh, G., Ali, S., Murawwat, S. A. A strategy for multi-objective energy optimization in smart grid considering renewable energy and batteries energy storage system // IEEE Access. 2023. Vol. 11. – P. 33872–33886. – <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2023.3263264>

13 Iwan, A., Bogdanowicz, K. A., Pich, R., Gonciarz, A., Miedziak, J., Plebankiewicz, I., Przybyl, W. The safety engineering of sodium-ion batteries used as an energy storage system for the military // Energies. – 2025. Vol. 18. – № 4. P. 978. – <https://doi.org/10.3390/en18040978>

14 Chang, X., Yang, Z., Liu, Y., Chen, J., Wu, M., Li, L., Chou, S., Qia, Y. The guarantee of large-scale energy storage: non-flammable organic liquid electrolytes for high-safety sodium ion batteries // Energy Storage Materials. – 2024. Article 103407. – <https://doi.org/10.1016/j.ensm.2024.103407>

15 Delmas, C. Sodium and sodium-ion batteries: 50 years of research // Advanced Energy Materials. – 2018. Vol. 8. – № 17. – P. 1703137. – <https://doi.org/10.1002/aenm.201703137>

Поступило в редакцию 16.05.25.

Поступило с исправлениями 21.10.25.

Принято в печать 05.12.25.

*Д. Д. Айкимбаева¹, Г. Г. Таткеева²

¹ШЖК «Жоғары көлік және коммуникация колледжі» МКК, Қазақстан Республикасы, Астана қ.;

²С. Сейфуллин атындағы Қазақ агротехникалық зерттеу университеті, Қазақстан Республикасы, Астана қ.

16.05.25 ж. баспаға түсті.

21.10.25 ж. түзетулерімен түсті.

05.12.25 ж. басып шығаруға қабылданды.

КҮН ЭЛЕКТР СТАНЦИЯЛАРЫ ҮШІН НАТРИЙ-ИОНДЫ АККУМУЛЯТОРЛАР НЕГІЗІНДЕ ЭНЕРГИЯ ЖИНАҚТАУ ЖҮЙЕЛЕРІН ОҢТАЙЛАНДЫРУ

Зерттеудің өзектілігі күн электр станцияларының ауыспалы генерация жағдайында тұрақтылығы мен тиімділігін арттыру қажеттілігімен анықталады. Декарбонизацияға және жаңартылатын энергия көздерінің үлесін кеңейтуге бағытталған қазіргі заманғы энергетикалық жүйелерде тәуліктік және маусымдық өндіріс ауытқуларын теңестіруге қабілетті энергия жинақтаушыларды біріктірудің маңыздылығы артып келеді. Осы

тұрғыдан алғанда, натрий-ионды аккумуляторлар сирек кездесетін ресурстарға тәуелділікті азайту контекстінде дәстүрлі литий-ионды жүйелерге балама ретінде экономикалық және технологиялық тұрғыдан перспективалы шешім болып табылады.

Мақалада натрий-ионды аккумуляторларды қолдана отырып, энергия жинақтау жүйелерінің архитектурасы мен жұмыс режимдерін оңтайландырудың ғылыми негізделген тәсілдерін қалыптастыру, олардың сенімділігі мен фотоэлектрлік генерация параметрлеріне бейімделу деңгейін арттыру мақсаты қойылды.

Зерттеу әдіснамасы аясында ғылыми әдебиеттерге, аккумуляторлық блоктардың техникалық және пайдалану сипаттамаларына, заряд-разряд циклдерін басқару және болжау модельдеріне, сондай-ақ гибридік қондырғылардағы энергия алмасу параметрлеріне теориялық талдау жүргізілді. Салыстырмалы-аналитикалық әдістер, жүйелік тәсілдер және озық инженерлік шешімдерді жинақтау қолданылды.

Ғылыми жаңалығы – күн электр станциялары үшін натрий-ионды жинақтау жүйелерін таңдаудың және конфигурациялаудың критерийлерін жүйелеу, сондай-ақ оларды өндіріс пен тұтынудың өзгермелі жағдайларына бейімдеу бойынша ұсыныстар әзірлеу.

Зерттеу нәтижесінде аталған жүйелерді енгізуге кедергі келтіретін негізгі технологиялық, экономикалық және инфрақұрылымдық мәселелер анықталды; ең тиімді шешім – интеллектуалды басқару және болжау жүйелерімен жабықталған модульдік конфигурациялар екені дәлелденді. Машиналық оқытуға негізделген бейімделгіш басқару модельдерін қолдану энергия тәуелсіздігін және күн станцияларының рентабельдігін арттыратыны дәлелденді.

Болашақ зерттеу перспективаларына жинақтау жүйелерінің гибридік архитектурасын дамыту, жұмыс режимдерін оңтайландыру үшін цифрлық егіздерді енгізу, сондай-ақ өнеркәсіптік және децентрализовандық энергетикалық жүйелер деңгейінде стандарттау жатады.

Кілтті сөздер: энергетикалық тұрақтылық, болжау жүйесі, модульдік жинақтағыштар, бейімделгіш басқару, фотоэлектрлік өндіріс.

*D. D. Aikimbayeva¹, G. G. Tatkeyeva²

¹REM «Higher College of Transport and Communications»,
, Republic of Kazakhstan, Astana.;

²S. Seifullin Kazakh Agrotechnical Research University
Republic of Kazakhstan, Astana.

Received 16.05.25.

Received in revised form 21.10.25.

Accepted for publication 05.12.25.

OPTIMIZATION OF ENERGY STORAGE SYSTEMS FOR SOLAR POWER PLANTS BASED ON SODIUM-ION BATTERIES

The relevance of this study is determined by the growing need to improve the stability and efficiency of solar power plants under variable generation conditions. In modern energy systems focused on decarbonization and expanding the use of renewable energy sources, the role of energy storage becomes critical for smoothing daily and seasonal fluctuations in electricity output. In this context, sodium-ion batteries are considered a technologically and economically viable alternative to traditional lithium-ion systems, especially in terms of reducing dependence on scarce raw materials.

The aim of the article is to develop scientifically grounded approaches to optimizing the architecture and operational modes of energy storage systems based on sodium-ion batteries, with a focus on increasing their reliability and adaptability to the parameters of photovoltaic generation.

The methodological framework of the study includes a theoretical analysis of scientific literature, technical and operational characteristics of battery systems, forecasting and control models for charge-discharge cycles, and parameters of energy exchange in hybrid installations. Comparative-analytical methods, a systems approach, and synthesis of advanced engineering practices were applied.

The scientific novelty lies in the systematization of criteria for selecting and configuring sodium-ion batteries for solar energy applications, as well as in the development of practical recommendations for their adaptation to fluctuating generation and consumption conditions.

As a result of the study, key technological, economic, and infrastructural challenges of deploying sodium-ion energy storage systems were identified. It was found that modular configurations with intelligent forecasting and management systems are the most effective. It was also demonstrated that

the use of machine learning-based adaptive control models enhances energy autonomy and economic viability of solar installations.

Future research directions include the development of hybrid storage architectures, implementation of digital twins for optimizing operating regimes, and standardization of solutions for both industrial and decentralized energy systems.

Keywords: energy resilience, predictive control, modular storage units, adaptive operation, photovoltaic output.

<https://doi.org/10.48081/BGZB9542>

Ж. Е. Байжұма¹, Н. Б. Қаласов², *Г. О. Ильясова³

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

Қазақстан Республикасы, Алматы қ.

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

²ORCID: <https://orcid.org/0009-0008-6205-4959>

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

*e-mail: yliyasova_gulzhan@mail.ru

ҚАЛДЫҚ ЖЫЛУДЫ ТИІМДІ ПАЙДАЛАНУ ҮШІН ЖЫЛУ АЛМАСТЫРҒЫШТЫ CFD АРҚЫЛЫ ТАЛДАУ

Бұл зерттеу қалдық жылууды тиімді пайдалану «Құбыр ішіндегі құбыр» жылу алмастырғыштың жылу гидравликалық өнімділігін зерттейді, ол тура және қарсы ағын конфигурацияларын салыстырмалы талдауға назар аударады. Зерттеудің негізгі бағыты тура және қарсы ағыс конфигурациясын талдау болып табылады. Рейнольдс саны (Re) 1000-ден 5000-ге дейінгі аралықта негізгі параметрлерді, соның ішінде Колберн факторы (j) және үйкеліс факторы (f) мәндерін қарастырды. Қарсы ағын конфигурациясы тура ағынға қарағанда жоғары мәндерге ие болды, (j) мәндері 0.04-тен 0.02-ге дейін өзгеріп, қысым жоғалтулары азайды (f) 0.01-ден 0.006-ға дейін, ал тура ағын жоғары (j) мәндерін (0.05-тен 0.03-ке дейін) көрсетті, бірақ (f) өсті (0.015-тен 0.007-ге дейін). BSL $k-\omega$ турбуленттілік моделі ($Re = 4000$)-де SST $k-\omega$ -мен салыстырғанда ең тиімді болып танылды, CFD нәтижелері (j) үшін 8–25%, (f) үшін 0–20% ауытқу көрсетті. Зерттеу қарсы ағынды конструкцияның артықшылықтарын айқындап, гидравликалық диаметр мен ағын жылдамдығы сияқты параметрлерді оңтайландыру қажеттігін атап өтеді, сондай-ақ күрделі геометрияларды зерттеуді ұсынады. Бұл нәтижелер тұрақты жылу энергиясын қайта пайдалану технологияларын дамытуға сенімді негіз бола алады.

Кілтті сөздер: жылу алмастырғыш, қалдық жылу, энергия тиімділігі, Колберн факторы, үйкеліс факторы, CFD.

Кіріспе

Энергетикалық жүйелердің тұрақты дамуына, энергия тиімділігін арттыруға және парникті газдардың шығуын азайтуға бағытталған жаһандық талаптар ықшам және жоғары өнімді жылу алмастырғыштарды жобалауға арналған зерттеулерді жандандыруда [1]. Қазіргі заманғы энергетикалық жүйелерде, көлік саласында, салқындату жүйелерінде және жаңартылатын энергия көздерінде шектеулі кеңістікте жоғары жылу беру тиімділігіне қол жеткізу қажеттілігі барған сайын өзекті бола түсуде. Бұл әсіресе қатты оксидті отын элементтері (SOFC) [2], микрогаз турбиналары (MGT), ішкі жану қозғалтқыштарына арналған салқындату жүйелері, HVAC&R жүйелері [3], аэроғарыштық және болашақ энергетикалық жүйелер үшін өте маңызды. Мұндай құрылғыларда жиі кездесетін негізгі мәселе – қысым жоғалтуды азайта отырып, жылуалмасу тиімділігін арттыру [4]. Осыған байланысты, ықшам әрі жоғары өнімді жылуалмастырғыштарды әзірлеу қазіргі энергетика ғылымындағы өзекті және өмірлік маңызды бағыттардың біріне айналды. Энергия тиімділігін арттыру және қалдық жылууды пайдалану үшін жоғары температуралы жылууды қалпына келтіретін алмастырғыштар кеңінен қолданылады. Бұл жылу алмастырғыштар әдетте ықшам құрылымдармен ерекшеленеді және жылууды жұмыс сұйықтығына тиімді беру үшін арнайы геометриялық конфигурациялармен жабдықталған. Қазіргі уақытта қарапайым қанаттар [5], түйреуіштер [6], офсеттік жолақты қанаттар [7], гофрленген қанаттар [8], перфорацияланған және толқынды қанаттар сияқты әртүрлі қанатты құрылымдар кеңінен зерттелуде. Осы құрылымдардың жылу беру тиімділігін арттыру мақсатында көптеген эксперименттік және есептеу (CFD) зерттеулері жүргізілді.

Осы зерттеулердің логикалық жалғасы ретінде геометриялық инновациялар, атап айтқанда спиральды және қос спиральды қанатты жылу алмастырғыштар (DSFHE) айтарлықтай қызығушылық тудырды. Мұндай құрылымдар ағынның турбуленттілігін күшейтіп, жылуалмасу бетінің ауданын ұлғайту арқылы жылу беру тиімділігін едәуір арттыруға мүмкіндік береді. Junjie L. және Yun M. K. және әріптестері [9;10] кеңістігі шектеулі қолданбаларда дәстүрлі спиральды қанаттармен салыстырғанда ыдыс тәрізді құрылымдардың жоғары тиімділігін дәлелдеді бұл j -факторы мен жылу ағынының тығыздығының жақсаруымен расталды және ребристі құбырлармен жабдықталған жылу алмастырғыштардағы (FTHE) ауа жағынан жылу берілуіне және үйкеліс әсерінен болатын қысым шығындарына әсер ететін негізгі параметрлерге жан-жақты талдау жасалып, j және f коэффициенттерінің эксперименттік және сандық корреляциялары салыстырылып, ең тиімді параметрлер анықталды. Сонымен қатар, Punnoose A. және оның әріптестері [11] спиральды

қанатты түтіктер санының артуы Нуссельт санын және салқындату қабілетін жоғарылататынын, бірақ сонымен қатар қысым жоғалтуын да арттыратынын атап өтті. Осы себепті геометриялық параметрлерді оңтайландыру қажеттілігі туындайды. Бұл мәселені шешу үшін қазіргі уақытта компьютерлік модельдеу әдістері мен жасанды нейрондық желілер (ANN) кеңінен қолданылуда.

Акула құрылымына ұқсас биомиметикалық қанаттар да жылу алмасуды арттыруда кеңінен қолданылады. Бұл құрылымдар екіншілік ағындарды тудыру және турбуленттілікті күшейту арқылы жылу беру тиімділігін жақсартады. Jin Y., Zijin Zh. және әріптестері [12] биондық қанаттардың геометриясын оңтайландыру үшін жасанды нейрондық желілерді (ANN) және NSGA-II алгоритмін қолданып, Колберн факторы (j) мен үйкеліс факторы (f) көрсеткіштерін жақсартуға қол жеткізген. Бұл табиғи формаларды есептеу әдістерімен үйлестірудің тиімділігін көрсетеді және қиғаш эллипстік қос тесікті (DPIE) турбулизаторлар Нуссельт санын едәуір арттыра отырып, үйкеліс факторының тек шамалы өсуіне себеп болады, нәтижесінде жылуалмасудың максималды тиімділігі қамтамасыз етілген. Мұндай пассивті әдістер қос құбырлы жылуалмастырғыштар үшін тиімді әрі үнемді шешімдер болып табылады.

Октадрлік немесе үштік периодты минималды беттік (TPMS) торлы жақтау материалдары (LFM) сияқты жетілдірілген материалдық шешімдер механикалық беріктігін сақтай отырып, жылу беруді жақсартады. TPMS негізіндегі жылу алмастырғыш конструкциялары жылу кедергісін төмендететінін және тиімділікті арттыратынын көрсетті, дегенмен олар қысымның жоғалуын арттырады, бұл одан әрі оңтайландыруды қажет етеді [13; 14; 15].

Алайда, күрделі геометриялар мен турбулентті ағындарды дәстүрлі эмпирикалық тәуелділіктер негізінде модельдеу шектеулі қолдану аясынан тыс қиындықтар тудырады. Сондықтан ANSYS Fluent және CFX сияқты есептеуіш гидрогаздинамика (CFD) құралдары ағын құрылымдары мен жылуалмасу процестерін жан-жақты талдауға мүмкіндік береді. CFD қазіргі таңда қанаттардың бұрышын, арақашықтығын және орналасу ретін бағалауда маңызды құралға айналды. Алайда, CFD модельдеудің есептеу шығындары өте жоғары болғандықтан, барлық ықтимал конструкциялық нұсқаларды толықтай зерттеу іс жүзінде тиімсіз. Осы мәселені шешу мақсатында, соңғы уақытта CFD нәтижелерімен үйлестірілген мәліметтерге негізделген жуықтаушы модельдер - мысалы, жасанды нейрондық желілер (ANN) мен генетикалық алгоритмдер (GA) кеңінен қолданылуда. Мысалы, Naresh K. және әріптестері CFD деректеріне негізделген ANN көмегімен j және f факторларын дәл болжай алды. Сондай-ақ ANN және NSGA-II алгоритмін қолданып биондық қанаттардың құрылымын оңтайландырып, қысым жоғалтуларын шектеу арқылы жылуалмасуды жақсартуға сонымен қатар

модельдерді жобалау параметрлерінің кең ауқымында жылдам әрі нақты болжаулар жасауға мүмкіндік береді.

Long Zh. және әріптестері [16] қатты оксидті отын элементтеріне (SOFC) арналған пластиналы жылуалмастырғыштардың геометриясын CFD негізінде оңтайландырып, Колберн факторының (j) 31.87 %-ға өсуіне, j/f қатынасының 20.75 %-ға жақсаруына және қысым жоғалтудың 58 %-ға төмендеуіне қол жеткізді. Бұл нәтижелер CFD-ге негізделген параметрлік оңтайландырудың тиімділігін нақты көрсетеді. Соңғы зерттеулер жылуалмастырғыштардың өнімділігін арттыру үшін беткі жабындарды, перфорацияланған қанаттарды және жетілдірілген модельдеу әдістерін қолдануға баса назар аударады. Мысалы, Han Ch. және әріптестері [17] қанатты-түтік жылуалмастырғыштарға бірқабатты көміртекті нанотүтікшелер (SWCNT) жабындысын қолданып, Колберн факторының 10.5 %-ға артуына және үйкеліс коэффициентінің 9.1 %-ға төмендеуіне қол жеткізді. Бұл әдіс HVAC жүйелері мен энергия үнемдеуге бағытталған технологиялар үшін перспективалы шешім бола алады. Сондай-ақ Gursheer A. және әріптестері [18] перфорацияланған толқынды қанаттарды CFD арқылы зерттеп, j -фактордың 19–35 % және f -фактордың 21–33 % аралығында өсуін байқады. Бұл жақсартулар ағын турбуленттілігінің күшеюі мен шекаралық қабаттың бұзылуымен байланысты.

Бұл зерттеулер жиынтығы ықшам, қысым жоғалтулары төмен және жоғары тиімділікті жылуалмастырғыштарды жасау мақсатында CFD, мәліметтерге негізделген жуықтаушы модельдер, сондай-ақ нанокұрылымдар мен 3D-басып шығарылған торлы құрылымдар сияқты инновациялық материалдар мен геометриялардың маңызды рөлін айқын көрсетеді. Бұл зерттеу бағыттары болашақта тұрақты және тиімді жылуалмасу жүйелерін дамытуға берік ғылыми-технологиялық негіз қалайды.

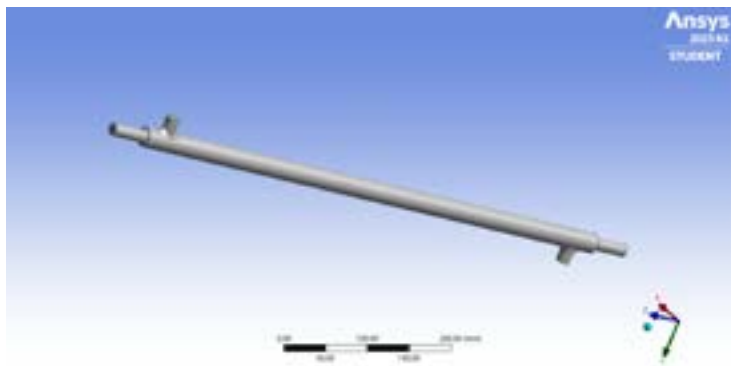
Қорытындылай келе, мақалада жылу алмастырғыштардың жұмысын жақсарту үшін сұйықтықтың есептеу динамикасын (CFD), жасанды нейрондық желілерді (ANN), генетикалық алгоритмдерді (GA) және биоинспирацияланған фин құрылымдарын қолдануға баса назар аударылады. Бұл құралдар күрделі геометриялар мен жұмыс жағдайлары бойынша жылу және гидравликалық сипаттамаларды дәл болжауға мүмкіндік береді. Мақаланың келесі бөлімдерінде CFD қосымшалары, валидация әдістері, торлы тәуелсіздікті зерттеу, болашақ бағыттар және тиімді жылу алмастырғыштарды жасаудағы кемшіліктер қарастырылады.

Материалдар мен әдістері

Сандық модельдеу

Бұл зерттеу ANSYS Fluent (CFD) бағдарламалық құралын пайдаланып қос құбырлы жылу алмастырғышты сандық талдауға бағытталған. Жылу

алмастырғыш екі концентрлі құбырдан тұрады, онда ішкі құбыр ыстық сұйықтық ағынын, ал ішкі және сыртқы құбырлар арасындағы сақиналы кеңістік суық сұйықтық ағынын өткізеді. Жылу беру тиімділігіне және қысымның төмендеуіне әсерін бағалау үшін ағынның екі конфигурациясы зерттелді: тура ағын және қарсы ағын. Құбыр ішіндегі құбыр жылу алмастырғыштың моделі және параметрлері 1-суретте және 1-кестеде көрсетілген.



1-сурет – құбыр ішіндегі құбыр жылуалмастырғыш геометриясы

1-кесте – Құбыр ішіндегі құбыр жылу алмастырғыштың геометриялық параметрлері

Параметрлері	Белгіленуі	Мағынасы
Сыртқы құбыр диаметрі	d_2	24 мм
Ішкі құбыр диаметрі	d_1	12 мм
Сыртқы құбыр ұзындығы	L_2	350 мм
Ішкі құбыр ұзындығы	L_1	400 мм
Құбыр саны	n	1 дана

Шекаралық шарт

Шекаралық шарттарды дәл анықтау сандық модельдеудің дәлдігіне айтарлықтай әсер етеді. Осы 2-кестеде және зерттеуде құбыр ішіндегі құбыр жылу алмастырғышқа келесі шекаралық шарттар қолданылды (тура және қарсы ағынның конфигурациясы үшін): ыстық судың кірісі мен суық судың кірісі массалық ағынның кірісі ретінде анықталды, ал ыстық судың шығысы және суық судың шығысы қысым шығысы ретінде орнатылды.

2-кесте – Ыстық және суық сұйықтықтар үшін жылу беру және үйкеліс коэффициенттері тура және қарсы ағындарында

Рейнольдс саны (Re)	тура ыстық ағыс j	тура ыстық ағыс f	қарсы ыстық ағыс j	қарсы ыстық ағыс f	тура ыстық ағыс Nu	қарсы ыстық ағыс Nu
1000	0.05	0.015	0.04	0.01	44.0	35.2
2000	0.045	0.013	0.035	0.009	79.2	61.6
3000	0.04	0.011	0.03	0.008	105.6	79.2
4000	0.035	0.009	0.025	0.007	123.2	88.0
5000	0.03	0.007	0.02	0.006	132.0	88.0

Рейнольдс саны (Re)	тура суық ағыс j	тура суық ағыс f	қарсы суық ағыс j	қарсы суық ағыс f	қарсы суық ағыс Nu	тура суық ағыс Nu
1000	0.045	0.012	0.035	0.008	63.3	81.5
2000	0.042	0.011	0.032	0.007	115.9	152.2
3000	0.038	0.010	0.028	0.006	150.8	205.0
4000	0.033	0.008	0.022	0.005	159.3	239.0
5000	0.025	0.006	0.015	0.004	135.2	226.5

Қатты дене материалы ретінде алюминий қолданылған. 2-суретте модельдің алдыңғы және бүйір жақтарындағы тор құрылымының орналасуы көрсетілген. Жұмыс ортасы ретінде су қарастырылған. Қатты денелер аймағында бейқұрылымды тор қолданылса, сұйық орта аймағының негізгі бөлігінде құрылымды тор жүйесі пайдаланылған.



2-сурет – Құбыр ішіндегі құбыр жылу алмастырғыштың торлы құрылымы

Тордың тәуелсіздігін тексеру

Тордың өлшемі кішірейген сайын сандық модельдеу нәтижелерінің дәлдігін жақсартады. Дегенмен, жоғары дәлдікке қол жеткізу айтарлықтай есептеу ресурстарын қажет етеді. Тор элементтерінің саны белгілі бір шекті деңгейге жеткенде, олардың санын одан әрі көбейту нәтижелерге айтарлықтай қатты әсер етпейді. Сондықтан тордың оңтайлы өлшемін таңдау арқылы дәлдікті жоғалтпай есептеу уақытын қысқартуға және тиімді нәтижелер алуға болады.

3-кесте – Тордың тәуелсіздігін тексеру.

Тор саны (миллион)	j (Колберн факторы)	f (Фаннинг үйкеліс факторы)
1.9	0.00568	0.02920
2.3	0.00574	0.02885
3.2	0.00576	0.02860
5.0	0.00577	0.02865

3-кестеде келтірілген мәліметтерге сәйкес, тордың жалпы саны 1,9 миллионды құраған кезде Колберн коэффициентіндегі қайталану қателігі шамамен 2,6 % құрайды, бұл торлар саны 3,2 миллионға дейін өскен сайын 0,3 %-ға дейін төмендейді. Үйкеліс коэффициентінің (f) өзгеруі минималды болып қалады, барлық тексерілген тор тығыздықтарында 1,7 %-дан аспады. Есептеу дәлдігі мен ресурстық тиімділікті ескере отырып, соңғы сандық модельдеу үшін 3.2 миллион элементтен тұратын тор конфигурациясы таңдалды.

Айта кету керек, тор элементтерінің жалпы саны құрылымдық және геометриялық айырмашылықтарға байланысты әртүрлі модельдер арасында аздап өзгеруі мүмкін. Сонымен қатар, тордың сапасы CFD нәтижелерінің дәлдігін анықтауда шешуші рөл атқарады. Қабырға аймағына жақын орналасқан тордың ажыратымдылығының негізгі көрсеткіштерінің бірі-қабырғаның өлшемсіз қашықтығы, Y^+ , бұл тордың шекаралық қабатты шешу қабілетін көрсетеді.

Сұйықтық пен қатты зат арасындағы конвективті жылу алмасудың көп бөлігі жылу шекаралық қабатында жүретіндіктен, дәл нәтиже алу үшін сәйкес Y^+ диапазоны қажет. Осы зерттеуде қарастырылған параллель және қарсы ағынды конфигурациялар үшін Рейнольдс саны 2116-дан 5547-ге дейін ауытқиды, бұл сұйықтықтың түріне және ағынның бағытына байланысты ламинарлы және өтпелі ағын режимдерін қамтиды.

Барлық тор конфигурациялары үшін жылу тасымалдағыш беттерінде байқалған Y^+ мәндері 0,2-ден 0,9-ға дейінгі диапазонда болды, бұл қабырғаға жақын жылу әсерлерін шешу үшін қолайлы. Бұл мәндер шекаралық қабаттың

жеткілікті түрде шешілгенін және таңдалған тор жылу беру мен қысымның төмендеуі үшін сенімді және дәл болжамдарды қамтамасыз ететінін растайды.

Турбуленттілік моделін тексеру

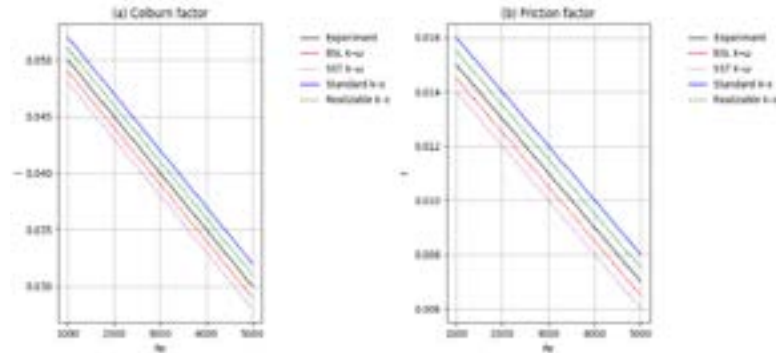
Турбуленттілік моделін дұрыс таңдау шағын жылуалмастырғыштардағы ағыс пен жылуалмасу процестерін талдауда сандық модельдеу нәтижелерінің дәлдігіне айтарлықтай әсер етеді. Әртүрлі турбуленттілік модельдері жылдамдық таралуы, температуралық градиенттер және қысым жоғалтулар бойынша әртүрлі болжамдар бере алады. Сондықтан толық масштабтағы модельдеуді бастамас бұрын таңдалған модельдерге валидация жүргізу қажет.

Осы зерттеу аясында, тура және қарсы ағын конфигурацияларындағы жылу және ағыс сипаттамаларын модельдеу үшін бірнеше кеңінен қолданылатын турбуленттілік модельдері қарастырылады. Қарастырылған модельдер қатарына стандартты $k-\epsilon$, realizable $k-\epsilon$, BSL $k-\omega$ және SST $k-\omega$ модельдері кіреді.

Олардың дәлдігін бағалау үшін модельдеу әр модель үшін бірдей шекаралық және жұмыс жағдайында жүргізілді, Ал Колберн коэффициенті (j) мен үйкеліс коэффициенті (f) бойынша нәтижелер 3-суретте салыстырылды. Салыстыру тек сандық сәйкестік пен модельдердің шоғырлану сипатына негізделді.

Салыстыруда, BSL $k-\omega$ және SST $k-\omega$ модельдері неғұрлым тұрақты және дәлірек көрсеткіш ауытқулары қолайлы шектерде қалды. Екінші жағынан $k-\epsilon$ және $k-\epsilon$ модельдері дәлірек емес нәтижелер көрсетті.

Барлық сыналған модельдердің ішінде BSL $k-\omega$ моделі есептеу тұрақтылығы мен физикалық дәлдік арасындағы ең жақсы жалпы тепе-теңдікті көрсетті. Сондықтан ол осы жұмыста кейінгі модельдеу үшін қолайлы турбуленттік модель ретінде таңдалды. Қорытындылардың дұрыстығын қамтамасыз ету үшін Рейнольдс саны 4000 болатын SST $k-\omega$ моделін қолдана отырып, қосымша тексеру жүргізілді. Нәтижелер шамалы ғана ауытқуларды көрсетті және BSL $k-\omega$ үлгісімен алынған нәтижелердің сенімділігін растады.



3-сурет – Турбуленттілік моделін тексеру.

Деректерді саралау

Жылу алмастырғыштың ағын жоғалтуы мен жылу беру сипаттамалары әдетте Колбурн факторы j және Фаннинг үйкеліс факторы f көмегімен сипатталады және өлшенеді, ол теңдеулер (1) және (2)-де көрсетілген.

$$j = \frac{Nu}{Re Pr^{1/3}} \quad (1)$$

Мұнда Nu , Re және Pr тиісінше Нуссельт саны, Рейнгольдс саны және Прандтль санын білдіреді, олардың есептеу формулалары тиісінше теңдеу (4), теңдеу (5) және теңдеу (6)-да берілген.

$$f = \frac{D_h \Delta P}{2L\rho v^2} \quad (2)$$

Мұнда ΔP кіріс пен шығыс арасындағы қысым айырмашылығын, D_h гидравликалық диаметрді білдіреді, оның есептеу формуласы теңдеу (3)-те берілген; L спиральді түтікшелер жиынтығының жалпы ұзындығын, ρ орташа ағын жылдамдығын көрсетеді.

$$D_h = 4 \frac{A_c}{A} L \quad (3)$$

Мұнда A жалпы жылу беру ауданын, A_c ең кіші кесінді ауданын білдіреді.

$$Nu = \frac{h_f D_h}{\lambda} \quad (4)$$

Мұнда h_f жалпы жылу беру коэффициентін, ал λ сұйықтың жылу өткізгіштігін білдіреді.

$$Re = \frac{\rho v D_h}{\mu} \quad (5)$$

Мұнда ρ сұйықтың тығыздығын, ал μ динамикалық тұтқырлығын білдіреді.

$$Pr = \frac{\mu C_p}{\lambda} \quad (6)$$

Мұнда C_p сұйықтың ерекше жылу сыйымдылығын білдіреді.

$$h_f = \frac{Q}{\Delta T_m A} \quad (7)$$

Мұнда Q жалпы берілетін жылу мөлшерін, ΔT_m логарифмдік орташа температура айырмашылығын білдіреді, ол теңдеу (8)-де берілген.

$$\Delta T_m = \frac{(T_{w1} - T_{f1}) - (T_{w2} - T_{f2})}{\ln((T_{w1} - T_{f1}) / (T_{w2} - T_{f2}))} \quad (8)$$

Жалпы тиімділік факторы JF келесі түрде берілген

$$JF = \frac{j}{f^{1/3}} \quad (9)$$

Нәтижелер және талқылау

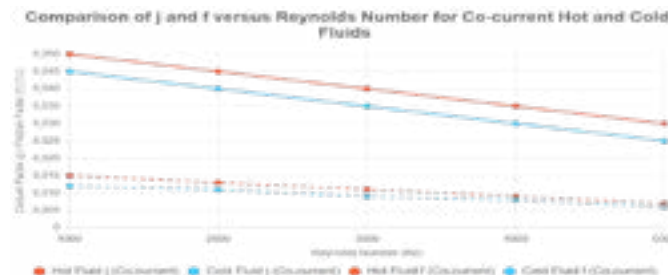
Бұл бөлім «құбыр ішіндегі құбыр» жылу алмастырғышты зерттеуге арналған, онда ыстық және суық су тура және қарсы ағын режимдерінде қозғалады. Негізгі мақсат – жылу беру тиімділігін және ағын динамикасының сипаттамаларын бағалау арқылы қалдық жылу ресурстарын пайдалануды оңтайландыру болып табылады. Негізгі модель геометриялық параметрлері оңтайландырылған конфигурация болып табылады. Эксперименттік және есептеуіш сұйық динамикасы (CFD) деректері жылу алмасу процестерінің тиімділігін салыстыру үшін қолданылады.

Тура және қарсы ағын режимдерінде жылу беру мен қысым жоғалтуын салыстыру

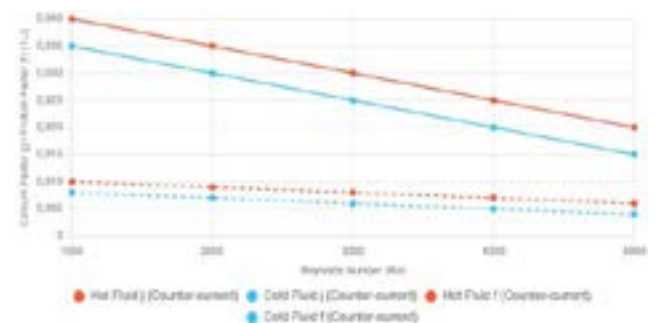
Бұл бөлімше «құбыр ішіндегі құбыр» жылу алмастырғышта ыстық және суық суды пайдалана отырып, тура және қарсы ағын конфигурациялары үшін Рейнольдс саны (Re) диапазоны 1000-ден 5000-ге дейінгі аралықта жылу беру тиімділігін көрсететін Колберн коэффициенті (j) мен қысым жоғалтуын көрсететін үйкеліс коэффициенті (f) салыстырмалы талдауын ұсынады. Эксперименттік деректер сызықтармен (толық немесе үзік) көрсетілсе, есептеуіш сұйық динамикасы (CFD) деректері нүктелермен бейнеленеді, бұл деректер жиынтықтары арасындағы айқын ажыратымдылықты қамтамасыз етеді.

3-суретте тура ағын конфигурациясы үшін ыстық суға арналған j мәні $Re=1000$ -де 0.05-тен $Re=5000$ -де 0.03-ке дейін төмендейді (толық қызыл сызық), ал f факторының мәні 0.015-тен 0.007-ге дейін кемиді (үзік қызыл сызық). Сол конфигурацияда суық су үшін j факторының 0.045-тен 0.025-ке дейін азаяды (толық көк сызық), ал f факторының 0.012-ден 0.006-ға дейін төмендейді (үзік көк сызық). Қарсы ағын конфигурациясында ыстық суға арналған j мәні $Re=1000$ -де 0.04-тен $Re=5000$ -де 0.02-ге дейін төмендейді (толық сары сызық), ал f факторының мәні 0.01-ден 0.006-ға дейін азаяды (үзік сары сызық). Қарсы ағын суық су үшін j факторының мәні 0.035-тен 0.015-ке дейін төмендейді (толық көгілдір сызық), ал f факторы 0.008-ден 0.004-ке дейін кемиді (үзік көгілдір сызық).

j және f факторларының мәндері екі конфигурацияда да ыстық суға қарағанда суық су үшін тұрақты түрде төмен, бұл әбден мүмкін, себебі сұйықтың тұтқырлығы мен жылу өткізгіштігі сияқты қасиеттеріндегі айырмашылықтарға байланысты. Тура ағын конфигурациясы төмен Re мәндерінде жылу беру тиімділігін арттырады, бірақ жоғары қысым жоғалтуларына әкеледі, бұл f фактор мәндерін жоғарылатады. Осыдан кері, қарсы ағын конфигурациясы жылу беру профилін біркелкі сақтайды және жоғары Re мәндерінде қысым жоғалтуын азайтады, бұл оны жылу алмастырғыштарды жобалауда тиімді қалдық жылу пайдалану үшін қолайлы етеді. Бұл нәтижелер ағын конфигурациясын таңдаудың жылу алмастырғыштардың қалдық жылу қайта өңдеу қолданбаларына арналған өнімділігін оңтайландырудағы маңыздылығын баса көрсетеді.

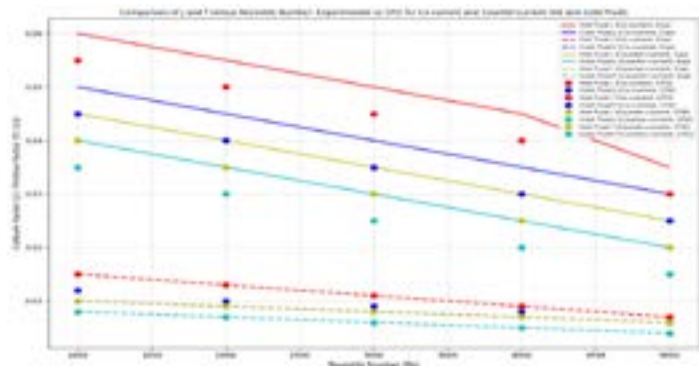


4-сурет – Тура ағын конфигурациясы (ыстық және суық су) үшін j және f факторларын салыстырылуы



5-сурет – Қарсы ағын конфигурациясы (ыстық және суық су) үшін j және f факторларын салыстырылуы

Бұл графикте Рейнольдс саны (Re) диапазоны 1000-ден 5000-ге дейінгі аралықта қарсы ағын конфигурациясында ыстық және суық су үшін жылу беру тиімділігін көрсететін Колбурн коэффициенті (j) мен қысым жоғалтуын көрсететін үйкеліс коэффициенті (f)-тің тәуелділігін ұсынады. Ыстық су үшін j мәндері $Re=1000$ -де 0.04-тен басталып, $Re=5000$ -де 0.02-ге дейін төмендейді (толық қызыл сызықпен көрсетілген), ал f мәндері 0.01-ден 0.006-ға дейін азаяды (үзік қызыл сызықпен көрсетілген). Суық су үшін j мәндері $Re=1000$, 0.035-тен басталып, $Re=5000$, 0.015-ке дейін төмендейді (толық көк сызықпен көрсетілген), ал f мәндері 0.008-ден 0.004-ке дейін кемиді (үзік көк сызықпен көрсетілген). j және f мәндері суық суда ыстық суға қарағанда аздап төмен, бұл сұйықтың қасиеттеріндегі айырмашылықтарға (мысалы, тұтқырлық) байланысты болуы мүмкін. Қарсы ағын конфигурациясы орташа жылу беру деңгейін сақтайды және қысым жоғалтуын азайтады, бұл жылу алмастырғыштардың тиімділігін арттыру үшін маңызды.



6-сурет – j және f факторларының Рейнольдс санына қатысты салыстырылу

j және f факторларының Рейнольдс санына қатысты салыстырылуы: тура және қарсы ағын ыстық және суық сұйықтар үшін эксперименттік пен CFD деректері

Қарсы ағын конфигурациясы

5-суретте қарсы ағын конфигурациясына назар аударады. Ыстық су үшін j мәні $Re=1000$, 0.04-тен $Re=5000$, 0.02-ге дейін төмендейді (толық қызыл сызық), ал f мәні 0.01-ден 0.006-ға дейін азаяды (үзік қызыл сызық). Суық су үшін j факторының мәні 0.035-тен 0.015-ке дейін төмендейді (толық көк сызық), ал f мәні 0.008-ден 0.004-ке дейін кемиді (үзік көк сызық). j және f факторларының мәндері суық суда ыстық суға қарағанда аздап төмен, бұл сұйықтың қасиеттеріндегі айырмашылықтарға (мысалы, тұтқырлық) байланысты болуы мүмкін. Қарсы ағын конфигурациясы орташа жылу беру деңгейін сақтайды және қысым жоғалтуын азайтады, бұл жылу алмастырғыштардың қалдық жылу пайдалану тиімділігін арттыруда маңызды.

Тәжірибелік және CFD салыстыру

6-суретте тәжірибелік және CFD нәтижелерін қолдана отырып, қосалқы және қарсы ағыс конфигурациялары үшін Колберн коэффициенті (j) мен үйкеліс коэффициенті (f) салыстырылады. Тәжірибелік мәліметтер әр түрлі түстермен және сызықтармен ұсынылған (мысалы, қатты қызыл сызық) j үшін ыстық сұйықтық бірлескен ағынында, үзік-үзік көк сызық f факторының мәні үшін суық сұйықтық бірлескен ағынында), ал CFD деректері сәйкес түсті нүктелермен көрсетілген (мысалы, қызыл нүктелер j факторы үшін ыстық сұйықтық бірлескен ағынында). 6-суретті талдай отырып, эксперименттік және CFD деректері арасындағы айырмашылықтар байқалады. j факторының коэффициенті эксперименттік мәндерді, CFD нүктелерінен жоғары көрсетеді.

Мысалы, $Re=1000$ кезіндегі бірлескен ағынындағы ыстық сұйықтық үшін тәжірибелік $j \approx 0.06$ ал, CFD $j \approx 0.055$. Айырмашылық Re жоғарылаған сайын аздап артады (мысалы $Re=5000$, $j \approx 0.035$ кезінде), дегенмен тенденция тұрақты түрде төмендейді. f коэффициенті тәжірибелік және CFD деректерін өте жақын, кейде бірдей етіп көрсетеді. Мысалы, $Re=1000$ кезіндегі бірлескен ағынындағы ыстық сұйықтық үшін екеуі де $f \approx 0.015$, ал $Re=5000$ кезінде екеуі де 0.007 құрайды. Бұл минималды айырмашылық мәндердің төмен диапазонына (0.01–0.015) және үйкеліс есептеулерінің дәлдігіне байланысты болуы мүмкін. Тәжірибелік және CFD деректерінің арасындағы айырмашылық j факторы үшін 8-25 % және f факторы үшін 0-20% аралығында болады. Ең үлкен қателік (25 %) $Re=5000$ кезінде қарсы ағынындағы суық сұйықтықтың j үшін байқалады, ал ең төменгі қателік (0 %) көптеген жағдайларда f факторы үшін орын алады.

j және f мәндері тұтқырлық және жылу өткізгіштік сияқты сұйықтық қасиеттерінің айырмашылығына байланысты екі конфигурациядағы ыстық сумен салыстырғанда суық су үшін тұрақты түрде төмен. Бірлескен конфигурациясы жылу берудің тиімділігін төменгі Re мәндерінде жоғарылатады, бірақ қысымның жоғарылауымен байланысты, бұл ағынның жоғары жылдамдығында қалдық жылуды қалпына келтіруге жарамдылығын шектейді. Керісінше, қарсы ағынның конфигурациясы біркелкі жылу беру профилін қамтамасыз етеді және қысымның жоғалуын азайтады, әсіресе жоғары Re мәндерінде, бұл жылу алмастырғышты оңтайландыру үшін тиімдірек етеді қалдықтарды жылуды тиімді пайдалану. Бұл нәтижелер қалдық жылуды қалпына келтіру қолданбалары үшін жылу алмастырғыштарды жобалаудағы ағын конфигурациясын таңдаудың маңызды рөлін көрсетеді.

Қаржыландыру туралы ақпарат

Бұл ғылыми мақала Қазақстан Республикасы Ғылым және жоғары білім Министрлігінің 2025–2027 жылдарға арналған ғылыми және ғылыми-техникалық жобалар бойынша гранттық қаржыландыру аясындағы AP26100165 «Бірегей жылулық қорғанысы бар шұғыл континенталды аймақтарға арналған жел турбинасын жобалау және жасау» жобасын іске асыру барысында жазылды.

Қорытынды

Бұл зерттеуде қалдық жылуды тиімді пайдалану мақсатында тура және қарсы ағын конфигурацияларын жан-жақты салыстыра отырып, «құбыр ішіндегі құбыр» жылу алмастырғыштағы жылу алмасу және ағын динамикасын оңтайландырудың жаңа тәсілі ұсынылып, оның тиімділігі негізделді. Алынған нәтижелер бұл конструкцияның жылуды қалпына келтіру жүйелерінде қолдануға жарамды және тиімді бола алатынын көрсетті.

Жоғары тиімділік: қарсы ток конфигурациясы жоғары жылу-гидравликалық өнімділікті көрсетті, Колберн коэффициентінің (j) мәндері 0,04-тен 0,02-ге дейін және бірлескен ток қондырғысымен салыстырғанда біркелкі жылу беру профилі (j) 0,05-тен 0,03-ке дейін. Рейнольдс саны 1000 болғанда, қарсы ағыны теңдестірілген тиімділікке қол жеткізді, ал тура ағыны қысымның жоғары шығынын көрсетті үйкеліс коэффициенті (f) 0,015-тен 0,007-ге дейін, бұл қарсы ағыс конструкциясының артықшылығын көрсетеді.

Геометриялық аспектілер: зерттеу көрсеткендей, ағынның жылдамдығы (мысалы, $v_{hot}=0,051 \times 10^{-3}$ м/сек $v_{cold}=0,053 \times 10^{-3}$ м/сек) және түтік геометриясы жылу беру тиімділігіне әсер етеді. Есептелген жылу беру қуаты ($Q_{hot}=236,34$ Вт, $Q_{cold}=256,87$ Вт) және температура градиенті ($\Delta t=16,62^\circ\text{C}$) энергияны қалпына келтірудің айтарлықтай әлеуетін көрсетеді, дегенмен гидравликалық диаметрді одан әрі оңтайландыру ұсынылады.

Турбуленттілік моделін таңдау: турбуленттілік модельдерін, оның ішінде стандартты $k-\epsilon$, іске асырылатын $k-\epsilon$, BSL $k-\omega$ және SST $k-\omega$ модельдерін бағалау, BSL $k-\omega$ моделін есептеу тұрақтылығы мен физикалық дәлдіктің тепе-теңдігін қамтамасыз ететін ең тиімді деп анықтады. $Re=4000$ кезінде SST $k-\omega$ -ге қарсы валидация оның болашақ модельдеуге жарамдылығын нығайта отырып, минималды ауытқуларды растады.

CFD валидациясы: тәжірибелік және CFD нәтижелері арасындағы сәйкессіздіктер (j факторы үшін 8–25 %, f факторы үшін 0–20 %) болашақ модельдеу жұмыстарында дәлдікті қамтамасыз ете отырып, тордың ажыратымдылығы мен сұйықтықтың қасиеттері туралы тексерілген деректерді нақтылау қажеттілігін көрсетеді.

Оңтайландыру мәселелері: Қарсы ағынды конфигурация жалпы тиімділік бойынша жоғары нәтиже көрсеткенімен, j факторының салыстырмалы түрде төмен мәндері геометриялық параметрлер немесе ағынның біркелкілігіне байланысты мүмкін болатын шектеулерді білдіреді. Бұл жағдай жылу алмастырғыштың құрылымдық параметрлерін оңтайландыру үшін қосымша зерттеулер жүргізуді қажет етеді.

REFERENCES

1 **Junjie, L., Uglanov, D.A., Naresh, K., Shimanov, A., Bowen, Z., Shimanova, A. B.** Numerical study on a new spiral fin heat Exchanger's thermal-hydraulic performance. // *Case Studies in Thermal Engineering*. – 61/ – 2024 – 104895. – P – 2.

2 **Naresh, K., Uglanov, D. A., Blagin, E. V., Gorshkalev, A. A.,**

Roman, A. P., Junjie, L., Unified ANN model for heat transfer factor (j) and friction factor (f) prediction in offset strip and wavy fin PFHEs. // *Case Studies in Thermal Engineering*. – 53. – 2024. – 103845. – P–2–4.

3 **Diani, A., Mancin, S., Zilio, C., Rossetto, L.** Experimental and numerical analyses of different extended surfaces. – // *International Journal of Thermal Sciences*. – 67. – 2013. – 120e134. P-4–6.

4 **Diani, A., Mancin, S., Zilio, C., Rossetto, L.** An assessment on air forced convection on extended surfaces: experimental results and numerical modeling // [International Journal of Thermal Sciences V. 67](#), May 2013.–P – 122–124.

5 **Wei, L., Xialing, W.** Heat transfer and pressure drop correlations for compact heat exchangers with multi-region louver fins. // *International Journal of Heat and Mass Transfer*. – 53 (2010) 2955–2962.–P–4.

6 **Xiangyang, Z., Zhaogang, Q.** A comprehensive review of offset strip fin and its applications // *Applied Thermal Engineering* 139 (2018) 61–75.–P–62–63.

7 **Shaeri, M. R., Yaghoubi, M., Jafarpur, K.** Heat transfer analysis of lateral perforated fin heat sinks. // *Applied Energy* 86 (2009) 2019–2029.–P-2021–2022.

8 **Wang, Ch., Fu, W.L., Chang, C.T.** Heat transfer and friction characteristics of typical wavy fin-and-tube heat exchangers, – New York. – // *Experimental Thermal and Fluid Science* 1997; 14:174–186 – P–175–176.

9 **Junjie, L., Uglanov, D. A., Naresh, K., Guanghua, Zh., Jinglun, F., Shimanov, A. A., Gaev E. S.** Enhanced compactness and thermal performance of a novel double spiral finned heat exchanger: A CFD and ANN approach, // *Applied Thermal Engineering* 275 (2025) 126910 – P–12–15.

10 **Yun, M. K., Joo, Y. S., Sangho, S., Chan, H. S., Morteza, K. A., Yongchan, K., Yong, T. K.** A critical review on Colburn j -factor and f -factor and energy performance analysis for finned tube heat exchangers, // *Energy* 287 (2024) 129609.–P–57–61.

11 **Punnoose, A., Shawkat Mostafa, M. E.** Thermal and hydraulic characteristics of multiple row spiral finned tube heat exchangers. – // *International Journal of Refrigeration*. – 130 (2021) 56–66.–P–61–65.

12 **Jin, Y., Zijin, Zh., Jussi, S., Jin, W., Lidija, C., Zheng, D.** Structure optimization of intercooler bionic fins based on artificial neural network and genetic algorithms, // *Energy* – 307 (2024) 132615.–P–2–10.

13 **Shiming, G., Mo H., Junjie, Y., Qu, Sh., Junhao, D., Xu, S.** Numerical and experimental investigations of a twisted copper heat exchanger with triply periodic minimal surfaces, // *International Communications in Heat and Mass Transfer* 165 (2025) 109099.–P–9–14.

14 **Jeon, S., Kim, S., Nili-Ahmadabadi, M., Man, Y., H., Yong, G. P.** Parametric study on the performance of heat exchangers with octahedral-type

lattice frame materials // International Journal of Heat and Mass Transfer 236 (2025) 126332.–P–6–13.

15 **Montazerifar, F., Amidpour, M., Abedi, Z.** Numerical investigation of turbulent nanofluid flow behavior in a multi-stream plate-fin heat exchanger with a novel design of fractal fins // Engineering Journal (2023) 72. – 431–449.–P–13–17.

16 **Long, Zh., Ji, Y., Yan, D., Lichao, J., Han, X., Kaiming, W., Jiajun, Y., Li, J.** Performance analysis and optimized design of an offset strip fin heat exchanger for kW-class SOFC systems. // International Journal of Hydrogen Energy 99 (2025) 123–136.–P–125–132.

17 **Han, Ch., Lee, S., Lee, D., Lee, M., Kim, J., Kim, Y.** Heat transfer characteristics of fin-tube heat exchangers coated with single-walled carbon nanotubes under various coating concentrations, // International Communications in Heat and Mass Transfer 153 (2024) 107349.–P–6–11.

18 **Gursher, A., Ranganayakulu, Ch.** Establishment of Colburn «j» factor and Fanning friction factor «f» correlations for a compact heat exchanger having perforated wavy fins using Computational Fluid Dynamics, // International Journal of Heat and Fluid Flow 108 (2024) 109484

08.07.25 ж. баспаға түсті.

22.07.25 ж. түзетулерімен түсті.

05.12.25 ж. басып шығаруға қабылданды.

*Ж. Е. Байжұма¹, Н. Қ. Қаласов², *Г. О. Ильясова³*

^{1,2,3}Казахский Национальный университет имени аль-Фараби,

Республика Казахстан, г. Алматы.

Поступило в редакцию 08.07.25.

Поступило с исправлениями 22.07.25.

Принято в печать 05.12.25.

АНАЛИЗ ТЕПЛООБМЕННИКА С ПОМОЩЬЮ CFD ДЛЯ ЭФФЕКТИВНОГО ИСПОЛЬЗОВАНИЯ ОСТАТОЧНОГО ТЕПЛА

Данное исследование посвящено изучению теплогидравлических характеристик теплообменника типа «труба в трубе», предназначенного для эффективного использования остаточного тепла, с акцентом на сравнительный анализ конфигураций с прямоточным и противоточным течением. Основное внимание уделено анализу конфигураций прямого и противоточного потока. В диапазоне чисел Рейнольдса (Re) от 1000 до 5000 были рассмотрены

ключевые параметры, включая значения факторов Колберна (j) и трения (f). Противоточная конфигурация показала более высокие значения (j) в диапазоне от 0.04 до 0.02 при снижении потерь давления (f) от 0.01 до 0.006, в то время как прямоточная конфигурация продемонстрировала более высокие значения (j) от 0.05 до 0.03, но с увеличением (f) от 0.015 до 0.007. Модель турбулентности BSL k- ω при Re = 4000 оказалась наиболее эффективной по сравнению с SST k- ω . Результаты CFD показали отклонения для (j) в диапазоне 8–25 % и для (f) в диапазоне 0–20 %. Исследование выявило преимущества противоточной конструкции, подчеркнув необходимость оптимизации таких параметров, как гидравлический диаметр и скорость потока, а также предложило дальнейшее изучение сложных геометрий. Эти результаты могут служить надежной основой для развития технологий повторного использования тепловой энергии в целях устойчивого развития.

Ключевые слова: теплообменник, остаточное тепло, энергоэффективность, фактор Колберна, фактор трения, CFD.

*Zh. Y. Baizhuma¹, N. B. Kalassov², *G. O. Ilyassova³*

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

Republic of Kazakhstan, Almaty.

Received 08.07.25.

Received in revised form 22.07.25.

Accepted for publication 05.12.25.

ANALYSIS OF A HEAT EXCHANGER USING CFD FOR EFFICIENT USE OF RESIDUAL HEAT

This study investigates the thermohydraulic performance of a «tube-in-tube» heat exchanger designed for efficient residual heat recovery, focusing on a comparative analysis of parallel-flow and counter-flow configurations. The primary emphasis is on analyzing the characteristics of parallel and counter-flow configurations. Within the Reynolds number (Re) range of 1000 to 5000, key parameters, including the Colburn factor (j) and friction factor (f), were examined. The counter-flow configuration exhibited higher (j) values ranging from 0.04 to 0.02 with reduced pressure losses (f) from 0.01 to 0.006, while the parallel-flow configuration showed higher (j) values from 0.05 to 0.03 but with increased (f) from 0.015 to 0.007. The BSL k- ω turbulence model at Re = 4000 proved to be the most effective compared

to the SST $k-\omega$ model. CFD results indicated deviations of 8–25 % for (j) and 0–20 % for (f). The study highlights the advantages of the counter-flow design, emphasizing the need for optimization of parameters such as hydraulic diameter and flow velocity, and suggests further investigation of complex geometries. These findings provide a robust foundation for advancing sustainable thermal energy recovery technologies.

Keywords: heat exchanger; residual heat; energy efficiency; Kolbern factor; friction factor; CFD.

SRSTI 45.41.33

<https://doi.org/10.48081/IXOC3704>

***A. Y. Batyrbek¹, G. A. Sivyakova², V. K. Tytiuk³**

^{1,2}Karaganda Industrial University, Republic of Kazakhstan, Temirtau;

³Kryvyi Rih National University, Ukraine, Kryvyi Rih.

¹ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-3369-6804>

²ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-7689-8433>

³ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-1077-3288>

*e-mail: a.batyrbek@ttu.edu.kz

MODELING THE ELECTROMECHANICAL SYSTEM OF DRUM FLYING SHEARS USING LAGRANGE EQUATIONS

This article presents mathematical modeling of the electromechanical system of drum flying shears in the conditions of the rolling mill CWBRM-1700 of JSC «Qarmet» based on the Lagrange equations of the second kind. The study is aimed at developing a dynamic model that takes into account the interaction of electric drives, kinematic links and cutting elements under high speeds and loads. The aim of the work is to develop a mathematical model of the electromechanical system of drum flying shears of the rolling mill CWBRM-1700 based on the Lagrange equations of the second kind, taking into account elastic deformations, inertial characteristics and external loads. Generalized coordinates, forces and moments acting in the system are determined, taking into account the technological features of the transverse metal cutting process. Based on the Lagrange equations, differential equations of motion are obtained that describe the dynamics of the system. An analysis of the influence of the parameters of electromechanical components on the accuracy and stability of the shears is carried out. The results of the study allow us to quantitatively evaluate the influence of elastic connections in the mechanical structure of flying shears on the kinematic characteristics of the upper and lower cutting drums, as well as to determine the amplitude-frequency parameters of the resulting dynamic loads. The developed mathematical model creates the possibility of precise optimization of technological cutting modes, a significant increase in energy efficiency and a significant reduction

in dynamic loads. This study can be useful for specialists in the field of automation of rolling production and design of electromechanical systems.

Key words: modeling, multimass system, electromechanical system, electric drive, hot rolling mill, elastic connections, drum flying shears.

Introduction

Continuous wide-band rolling mill (hereinafter referred to as CWBRM-1700) of JSC «Qarmet» are complex electromechanical systems in which an important role is played by equipment for transverse cutting of metal, in particular, drum flying shears. The efficiency of their operation directly affects the quality of products and the productivity of the entire mill [1; 2, P. 18]. However, the dynamic processes that occur during cutting of a moving strip are accompanied by significant mechanical loads, vibrations and elastic deformations, which requires an accurate mathematical description of the system to optimize control and increase reliability [3; 4; 5]. In this regard, the use of Lagrange equations of the second kind for constructing a mathematical model of drum flying shears seems promising, since this method provides a systematic account of kinetic and potential energy, as well as dissipative forces [6; 7].

The scientific novelty of the study lies in the application of the Lagrangian formalism for modeling a multi-mass system of flying scissors taking into account real operational factors, which allows for more accurate prediction of the dynamic operating modes of the equipment.

Materials and methods

Drum-type shears with an inclined upper knife are installed between the roughing and finishing groups of stands of the hot rolling mill «1700» of sheet rolling shop 1 of JSC «Qarmet» and are designed for cutting the front and rear ends of the rolled product (Figure 1).

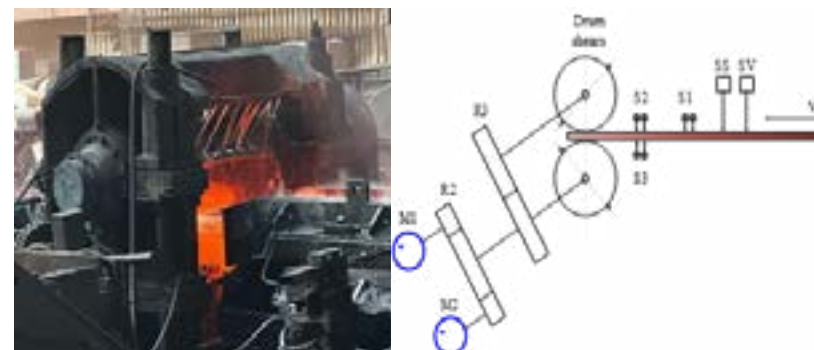


Figure 1 – General view of drum shears (a), process flow diagram and electromechanical equipment layout diagram (b) of drum shears of the hot rolling mill «1700»: S1, S2 – existing strip presence sensors; S3 – strip presence sensor (DELTA IRIS); SS – lane presence sensor (DELTA Rota – Sonde); SV – lane speed sensor (DELTA Velas DL 4068); VS – strip speed

At present, a reversible thyristor DC electric drive with independent excitation is used as an electric drive for flying shears at the CWBRM-1700 hot rolling mill. The shears are driven by two DC electric motors through a cylindrical gearbox. A double-anchor DC electric motor of the P19-75-7K type with independent excitation is used as a DC drive motor. Double-anchor motors are often used in flying shear electric drives due to their lower moment of inertia compared to single-anchor motors of the same power. The P19-75-7K type motor has the following technical characteristics: rated power – 1750 kW; armature voltage – 600 V; rotation speed – 190 rpm; rated current – 2980 A. The excitation windings are powered by built-in exciters of the SINAMICS 6RA8095-4GV62-0AA0 TC. The converters are selected with the required parameters of the built-in exciters. Figure 2 shows the electrical circuit diagram of the drum-type flying shear drive.

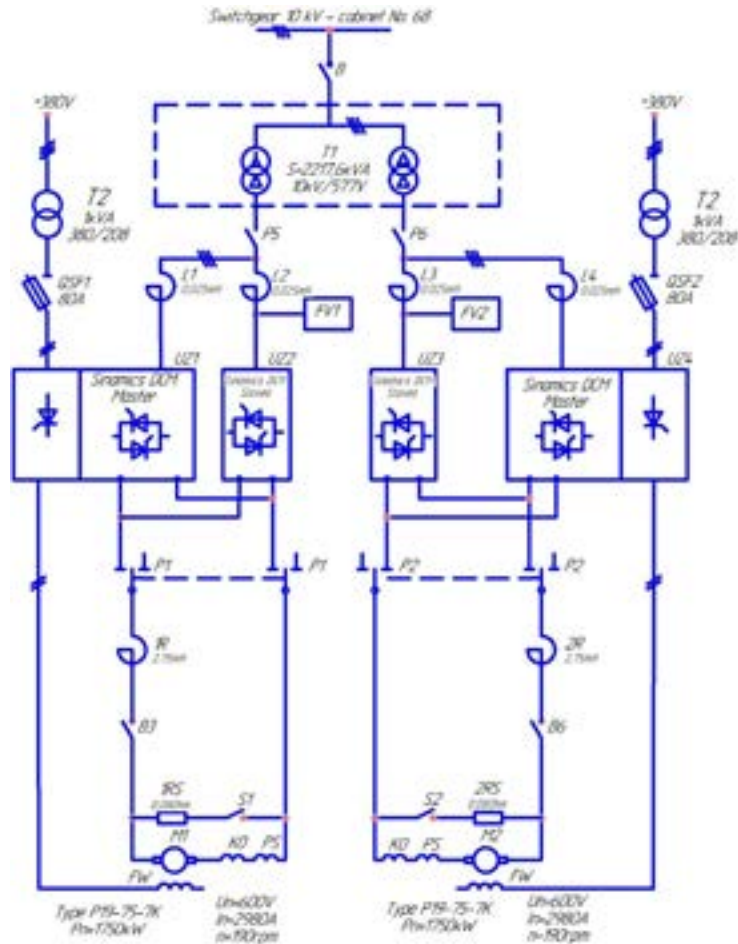


Figure 2 – Electrical schematic diagram of the drum-type flying shear drive

Mathematical modeling of a DC motor.

When modeling a DC motor with separate excitation, the following generally accepted assumptions are used:

- 1) the excitation current has a constant value;
- 2) we neglect the saturation value both along the main magnetic flux contour and along the scattering contour;
- 3) we do not take into account the influence of the eddy current circuit;

4) the machine is fully compensated, i.e. the influence of the anchor reaction is absent.

The system of equations of a DC motor in canonical form has the well-known form:

$$\begin{cases} L_{\Sigma} \frac{dI_A}{dt} = U_A - k\phi \cdot \omega - I_A R_{\Sigma} \\ J \frac{d\omega}{dt} = k\phi \cdot I_A - M_c \end{cases} \quad (1)$$

where L_{Σ} – is the total inductance of the armature circuit, H;

R_{Σ} – total active resistance of the anchor circuit, Ohm;

U_A – armature voltage, V;

I_A – armature current, A;

ω – and the angular velocity of the anchor 1/s;

J – moment of inertia of the anchor, kg·m²;

$k\phi$ – engine flux coefficient, V·s;

M_c – moment of resistance of the electric drive, N·m.

Also in this work we will neglect the discreteness of the operation of the adjustable thyristor converter, using modeling based on average values.

One of the most common methods of mathematical modeling of complex mechanical systems is the use of Lagrange equations. The most important characteristic of a mechanical system is the number of degrees of freedom (DOF, the degrees of freedom) [8]. In many scientific fields, the degrees of freedom of a system are understood as the number of system parameters that can change independently of each other.

For mechanical systems, the number of degrees of freedom H is equal to the number of independent coordinates that completely describe the state at an arbitrary point in the system.

These coordinates are called generalized coordinates and are denoted by the symbols q_1, q_2, \dots, q_H . Thus, the number of degrees of freedom is simultaneously the minimum necessary number of coordinates with which it is possible to cover all possible states of the system. [9, P. 164]; [10]. Accordingly, the first and second derivatives of generalized coordinates are called generalized velocity and generalized acceleration.

In practice, simultaneously with generalized coordinates it is advisable to use auxiliary coordinates, which are determined from generalized coordinates by constraint equations. These coordinates are redundant, but they increase clarity when studying the operation of mechanical systems.

The behavior of an arbitrary mechanical system can be exhaustively described by the well-known Lagrange equations of the second kind in generalized coordinates, which have the following form:

$$\frac{d}{dt} \left(\frac{\partial K}{\partial \dot{q}_i} \right) - \frac{\partial L}{\partial q_i} = Q_i, i = 1, 2 \dots H \quad (2)$$

where $L = (K - P)$ – Lagrange function;

K, P – respectively, kinetic and potential energy of a mechanical system;

Q_i is a generalized force of non-potential nature.

Generalized forces Q_i can be found from the sum of elementary works during virtual displacements:

$$\delta W = Q_1 \cdot \delta q_1 + Q_2 \cdot \delta q_2 + \dots + Q_H \cdot \delta q_H \quad (3)$$

Equating the coefficients of variations of generalized coordinates.

Since we are considering the motion of an electromechanical system of drum shears, in which all elements perform a rotational motion, we can make the following simplifying considerations:

1) the potential energy of the system under consideration includes only the energy of elastic deformation of individual elements of the system that have elastic properties;

2) to simplify the formulas, it is advisable to use the twist angle of the elastic element as a generalized coordinate for elements with elastic properties.

As shown in [9, p. [164]; [10], the Lagrange equations of the second kind (2) can be represented in expanded form in the form of a system of second-order differential equations:

$$\begin{cases} a_{11} \cdot \ddot{q}_1 + a_{12} \cdot \ddot{q}_2 + \dots + a_{1N} \cdot \ddot{q}_N + c_{11} \cdot \dot{q}_1 + c_{12} \cdot \dot{q}_2 + \dots + c_{1N} \cdot \dot{q}_N = Q_1 \\ a_{21} \cdot \ddot{q}_1 + a_{22} \cdot \ddot{q}_2 + \dots + a_{2N} \cdot \ddot{q}_N + c_{21} \cdot \dot{q}_1 + c_{22} \cdot \dot{q}_2 + \dots + c_{2N} \cdot \dot{q}_N = Q_2 \\ \dots \\ a_{N1} \cdot \ddot{q}_1 + a_{N2} \cdot \ddot{q}_2 + \dots + a_{NN} \cdot \ddot{q}_N + c_{N1} \cdot \dot{q}_1 + c_{N2} \cdot \dot{q}_2 + \dots + c_{NN} \cdot \dot{q}_N = Q_N \end{cases} \quad (4)$$

where a_{ij} are the generalized inertial coefficients; c_{ij} are the generalized quasi-elastic coefficients.

For the sake of compactness of presentation, we present equation (4) in vector-matrix form:

$$A \cdot \ddot{q} + C \cdot \dot{q} = Q \quad (5)$$

where q, \dot{q} are the column vectors of generalized coordinates and their second derivatives of dimension $[1 \times H]$; A, C are square matrices of generalized inertial coefficients and generalized quasi-elastic coefficients of dimension $[H \times H]$; Q is the column vector of generalized forces of dimension $[1 \times H]$.

Generalized inertial and quasi-elastic coefficients are found from the condition of equality of the coefficients of quadratic forms of the kinetic and potential energy of a mechanical system, respectively.

Let us compose the Lagrange equations of the second kind for a mechanical system of drum shears.

The calculation scheme of the mechanical system of drum shears can be significantly simplified by the following assumptions:

1) due to the insignificant length of the shafts connecting the drive motors with the reduction gear, it is permissible to neglect their elastic- viscous properties and exclude them from the calculation scheme. elastic-viscous elements $[c_1, b_1]$ and $[c_2, b_2]$;

2) due to the absence of elastic-viscous properties in the drive unit, it is advisable to present this unit as a single-engine unit, with an engine of double power and double the moment of inertia.

Taking these assumptions into account, we obtain the following three-mass calculation scheme of the mechanical system of drum shears, Figure 3.

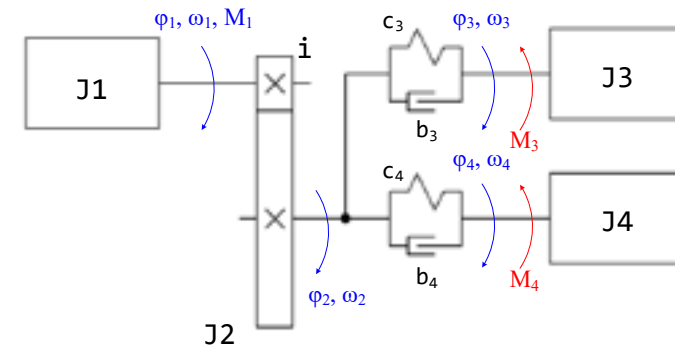


Figure 3 – Simplified three-mass calculation scheme of the mechanical part of drum-type shears

In the calculation scheme of Figure 3, the moment of inertia of the first mass J1 includes the moments of inertia of the two drive motors. Mass J2 includes both the moment of inertia of all elements of the reduction gear and the moment of

inertia of the distribution gear. Masses J3, J4 represent the upper and lower drum of the drum shears with their own moments of inertia.

The elastic-viscous elements [c3, b3] and [c4, b4] model the shafts between the distribution gear and, respectively, the upper D1 and lower D2 shear drums.

As the first generalized coordinate we will take the absolute value of the rotation angle at the beginning of the kinematic chain:

$$q_1 = \varphi_1 \quad (6)$$

As the second generalized coordinate we will take the twist angle of the elastic shaft 2–3, which is equal to the difference in the angles of rotation of the ends of this shaft:

$$q_2 = \varphi_3 - \varphi_2 \quad (7)$$

Accordingly, we will take the angle of twist of the elastic shaft 2–4 as the third generalized coordinate, which is equal to the difference in the angles of rotation of the ends of this shaft:

$$q_3 = \varphi_4 - \varphi_2 \quad (8)$$

Let us express the positions and angular velocities of the shafts of the kinematic scheme through generalized coordinates:

$$\begin{aligned} \varphi_1 &= \frac{q_1}{i} = \frac{q_1}{i} \\ \varphi_2 &= q_2 + \varphi_1 = q_2 + \frac{q_1}{i} \\ \varphi_3 &= q_2 + \varphi_2 = q_2 + \frac{q_1}{i} \\ \varphi_4 &= q_3 + \varphi_2 = q_3 + \frac{q_1}{i} \end{aligned} \quad (9)$$

Definition of inertial coefficients. Let us formulate an equation for the kinetic energy of the mechanism and represent it as a function of generalized coordinates:

$$\begin{aligned} K &= \frac{1}{2} (J_1 \cdot \omega_1^2 + J_2 \cdot \omega_2^2 + J_3 \cdot \omega_3^2 + J_4 \cdot \omega_4^2) \\ K &= \frac{1}{2} (J_1 \cdot \dot{\varphi}_1^2 + J_2 \cdot \dot{\varphi}_2^2 + J_3 \cdot \dot{\varphi}_3^2 + J_4 \cdot \dot{\varphi}_4^2) \end{aligned} \quad (10)$$

Substituting equation (9) into (10) after reducing similar terms, we obtain the following equation:

$$K = \frac{1}{2} \left(q_1^2 \cdot \left(J_1 + \frac{J_2 + J_3 + J_4}{i} \right) + q_2^2 \cdot J_2 + q_3^2 \cdot J_4 + \dots + 2 \frac{1}{i} \cdot q_1 \cdot q_2 + 2 \frac{1}{i} \cdot q_1 \cdot q_3 \right) \quad (11)$$

The kinetic energy of a mechanism can be represented as a complete quadratic form, which in the case of a mechanism with a number of degrees of freedom has the following form:

$$K = \frac{1}{2} (a_{11} \cdot q_1^2 + 2a_{12} \cdot q_1 \cdot q_2 + 2a_{13} \cdot q_1 \cdot q_3 + a_{22} \cdot q_2^2 + \dots + 2a_{23} \cdot q_2 \cdot q_3 + a_{33} \cdot q_3^2) \quad (12)$$

By equating equations (11) and (12), we obtain an equation for the matrix of inertial coefficients included in equation (5):

$$A = \begin{bmatrix} J_1 + \frac{J_2 + J_3 + J_4}{i} & \frac{1}{i} & \frac{1}{i} \\ \frac{1}{i} & J_2 & 0 \\ \frac{1}{i} & 0 & J_4 \end{bmatrix} \quad (13)$$

Definition of quasi-elastic coefficients. To determine the matrix of quasi-elastic coefficients, we will compile an equation of potential energy for the mechanism of drum shears. The potential energy of the mechanism is equal to the sum of the potential energies of all elastic-viscous links and, taking into account the adopted generalized coordinates, can be represented by the following equation:

$$\Pi = \frac{1}{2} (C_3 \cdot q_2^2 + C_4 \cdot q_3^2) \quad (14)$$

Representing the kinetic energy equation (14) in the form of a complete quadratic form similar to (12), we obtain the following expression for the matrix of quasi-elastic coefficients:

$$D = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 \\ 0 & C_3 & 0 \\ 0 & 0 & C_4 \end{bmatrix} \quad (15)$$

Definition of generalized forces. In addition to the torque of the electric drive M1 and the moments of resistance of the drums M3 and M4, it is necessary to take into account the moments of resistance of the dissipative forces R₁ and R₂, arising during the deformation of shafts 2–3 and 2–4, respectively.

Taking into account the adopted generalized coordinates, the equations for dissipative forces can be expressed as follows:

$$\begin{aligned} R_3 &= b_3 \cdot (\dot{\varphi}_3 - \dot{\varphi}_2) = b_3 \cdot \dot{q}_2 \\ R_4 &= b_4 \cdot (\dot{\varphi}_4 - \dot{\varphi}_2) = b_4 \cdot \dot{q}_2 \end{aligned} \quad (16)$$

The equation of work for small virtual displacements of the drum shear mechanism has the form:

$$\delta W = M_1 \cdot \delta\varphi_1 - M_3 \cdot \delta\varphi_3 - M_4 \cdot \delta\varphi_4 - R_3 \cdot \delta q_2 - R_4 \cdot \delta q_3 \quad (17)$$

Substituting into (17) the equations of relations (9) after reducing similar ones, we obtain the following expression:

$$\begin{aligned} \delta W &= \delta q_1 \cdot \left(M_1 - \frac{M_3 + M_4}{i} \right) - \delta q_2 \cdot (M_3 + b_3 \cdot \dot{q}_2) \\ &\quad - \delta q_3 \cdot (M_4 + b_4 \cdot \dot{q}_3) \end{aligned} \quad (18)$$

Thus, the column vector of generalized forces for the drum shear mechanism can be represented in the form:

$$Q = \begin{bmatrix} M_1 - \frac{M_3 + M_4}{i} \\ -(M_3 + b_3 \cdot \dot{q}_2) \\ -(M_4 + b_4 \cdot \dot{q}_3) \end{bmatrix} \quad (19)$$

For the convenience of mathematical modeling, it is necessary to divide expression (19) into two components: external forces and internal viscous forces depending on the derivatives of the generalized coordinates.

Taking into account such a transformation, we write the vector-matrix equation of the mechanical system in the form:

$$A \cdot \ddot{q} = B \cdot \dot{q} + C \cdot q + M \cdot T \quad (20)$$

In this equation, the matrix A is defined above by equation (13). The matrix $C = -D$:

$$C = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 \\ 0 & -C_2 & 0 \\ 0 & 0 & -C_4 \end{bmatrix} \quad (21)$$

According to (18), matrix B will have the form:

$$B = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 \\ 0 & -b_3 & 0 \\ 0 & 0 & -b_4 \end{bmatrix} \quad (22)$$

Column vector of external forces T has the form:

$$T = \begin{bmatrix} M_1 \\ M_3 \\ M_4 \end{bmatrix} \quad (23)$$

Then the matrix M will have the form:

$$M = \begin{bmatrix} 1 & -\frac{1}{i} & -\frac{1}{i} \\ 0 & -1 & 0 \\ 0 & 0 & -1 \end{bmatrix} \quad (24)$$

Let us solve equation (20) with respect to the highest derivative. We multiply both parts of the equation on the left by the inverse matrix of generalized inertial coefficients A^{-1} . We obtain the equation:

$$\begin{aligned} \ddot{q} &= A^{-1} \cdot B \cdot \dot{q} + A^{-1} \cdot C \cdot q + A^{-1} \cdot F \cdot T \\ \ddot{q} &= K \cdot \dot{q} + L \cdot q + M \cdot T \end{aligned} \quad (25)$$

The matrix structural diagram that implements the solution of equation (25) is shown in Figure 4.

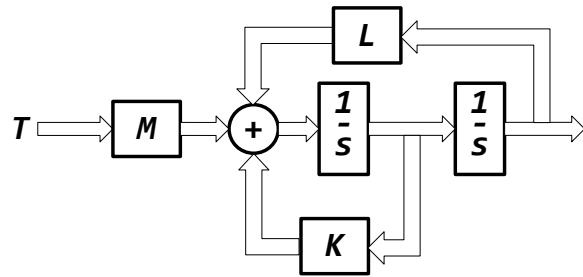


Figure 4 – Matrix structural diagram implementing the solution of the equations of a mechanical system in the form of Lagrange equations of the second kind

Coordinate transformation for observing the state of the model. The mathematical model of a mechanical system based on the Lagrange equations of the 2nd kind usually does not contain variables corresponding to the real angles of rotation of the shafts and the angular velocities of individual elements, which causes inconvenience when analyzing the model.

The actual rotation angles of the shafts and the angular velocities of the individual elements can be calculated based on the values of the generalized coordinates. In the case of the mechanical system of drum shears, Figure 5, these expressions are obtained above and are presented by formula (9).

Proper angular velocities are calculated using the same expressions, written relative to the first derivative of the rotation angles and generalized coordinates.

In matrix form, these expressions can be written as follows:

$$\varphi = F \cdot q; \omega = F \cdot \dot{q} \tag{26}$$

where φ , ω are respectively the column vectors of the proper rotation angles and angular velocities of the elements of the mechanical system; F is the coordinate transformation matrix.

In the case of a mechanical system of drum shears, we assume that the column vectors of the proper rotation angles and angular velocities of the elements of the mechanical system have the dimension $[1 \times 4]$, taking into account the mass J_2 .

Then, in accordance with equation (9), the coordinate transformation matrix will have the form:

$$F = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 1/i & 0 & 0 \\ 1/i & 1 & 0 \\ 1/i & 1 & 0 \\ 1/i & 0 & 1 \end{bmatrix} \tag{27}$$

Solving equations in MATLAB. To solve the differential equations of a multimass mechanical system in the form of Lagrange equations, presented in vector-matrix form by equations (25, 26), we use the MATLAB program, optimized for performing vector - matrix calculations. Based on the matrix structural diagram implementing the solution of the equations of a mechanical system in the form of Lagrange equations of the second kind, Figure 4, a mathematical model of the mechanical part of drum shears was developed in the MATLAB/Simulink environment, presented in Figure 5.

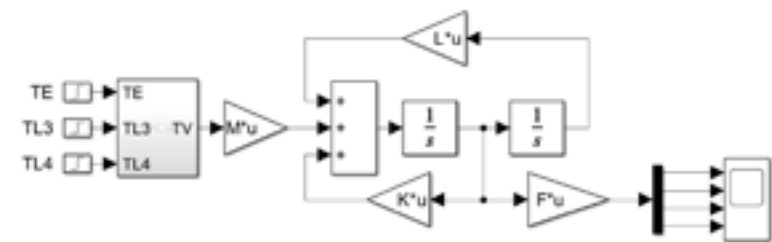


Figure 5 – Mathematical model of the mechanical part of drum shears in the MATLAB/Simulink environment

This model is universal, suitable for calculating an arbitrary mechanical system whose equations are presented in the form of Lagrange equations. The specificity of the object under study in this model is determined by the structure of the matrices K , L , M and the coordinate transformation matrix F . It is also necessary to correctly form the input vector of moments TV . The calculation of the numerical values of the parameters of the mathematical model of drum shears, Figure 5, is performed in a separate, pre-executed MATLAB script.

The results of the mathematical model of the mechanical part of drum shears are presented in Figure 6.

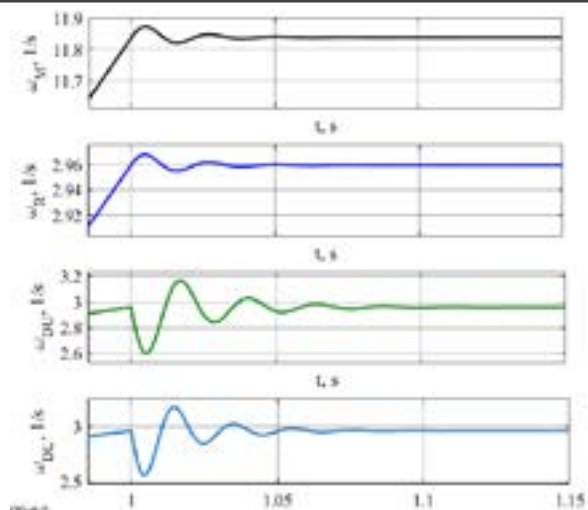


Figure 6 – Results of the mathematical model of the mechanical part of drum shears

The mathematical model considered the transient process of starting the drum shears under the action of a constant driving moment T_E . At the time $t = 1$ s, the balancing moments of resistance TL_3 and TL_4 are applied to the shear drums. When calculating the moments of inertia of individual elements of the mechanical part, the mathematical model takes into account the difference in the diameters of the upper and lower drums of the flying shears. Figure 6 shows a fragment of the transient process containing the process of applying loads to individual drums and transition to a steady state.

Results and discussion

The paper presents a fairly general approach to the synthesis of a mathematical model of mechanical systems in the form of vector-matrix equations with respect to generalized coordinates using the Lagrange equations of the second kind. Using the proposed approach, a mathematical model of the mechanical part of drum shears has been developed, presented in the form of a three-mass mechanical system taking into account the finite elasticity of mechanical connections. When calculating the parameters of the mathematical model of drum shears, real mass and size characteristics of drum shears installed on the continuous wide-strip mill CWBRM-1700 of JSC «Qarmet», Temirtau, were used.

MATLAB/Simulink was used to solve the equations of the mathematical model of the three-mass mechanical part of the drum shears.

The obtained results allow us to estimate the influence of elastic connections in the mechanical part of flying shears on the movement of the upper and lower drums, to estimate the magnitude of dynamic loads in the mechanical part. The difference in the movement of the upper and lower drums is due to the difference in the diameters of these drums.

The disadvantages of this study include the absence of direct current drive motors in the proposed model, which would allow us to clarify the nature of the processes occurring when a load is applied.

As a direction for further research, it is proposed to consider the possibility of complicating the equivalent mechanical circuit of drum shears.

Conclusion

A universal approach to the synthesis of equations of multi-mass mechanical systems with elastic connections and internal viscous friction based on the Lagrange equations of the second kind is proposed.

A mathematical model of the mechanical part of the drum shears of the continuous wide-strip mill CWBRM-1700 of JSC «Qarmet», Temirtau, was synthesized, presented in the form of an equivalent three-mass system.

The solution of the equations of this model is performed using MATLAB/Simulink.

The obtained results allow us to evaluate the influence of elastic connections in the mechanical part of flying shears on the movement of the upper and lower drums, and to evaluate the magnitude of dynamic loads in the mechanical part.

REFERENCES

- 1 Official website JSC «Qarmet». – [Electronic resource]. – URL : – <https://qarmet.kz>. (Date of request 02.05.2025).
- 2 Klimushkin, A. N. Hot rolling of strips in sheet rolling shop No. 1 // Technological instruction. – Temirtau. – 2017. – P. 125.
- 3 Nazarova, O. Computer Modeling of Multi-Mass Electromechanical Systems [Text] // Computer Modeling and Intelligent Systems. – 2020. – 2608. – <https://doi.org/10.32782/cmis/2608-36>.
- 4 Kaniuk, G., Vasylets, T., Varfolomiyev, O., Mezeria, A., Antonenko, N. Development of neural-network and fuzzy models of multimass electromechanical systems // Eastern-European Journal of Enterprise Technologies. – 2019. – Vol. 3/2 (99). – P. 51–63. – <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2019.169080>.
- 5 Aboah, B. E., Normanyo, E. Investigating Efficiency of a Five-Mass Electromechanical System having Damping Friction, Elastic Coupling and Clearance // International Journal of Engineering Research & Technology (IJERT). – 2017. – Vol. 6. – P. 94–98.

6 **De la Peña, L., Cetto, A., Valdés-Hernández, A.** Power and beauty of the Lagrange equations // Revista Mexicana de Física E. –2020. – Vol. 17. – P. 47–54. – <https://doi.org/10.31349/RevMexFisE.17.47>.

7 **Long, Y., Du, J., Yang, K., Yuan, S.** Modelling of a direct-driven electromechanical actuation system based on the Lagrange–Maxwell equation // IET Electric Power Applications. – 2021. – Vol. 15. – P. 1438–1451 – <https://doi.org/10.1049/elp2.12111>.

8 **Hu, H.** On the degrees of freedom of a mechanical system [Text] // Lixue Xuebao/Chinese Journal of Theoretical and Applied Mechanics. – 2018. – Vol. 50. – P. 1135–1144. – <https://doi.org/10.6052/0459-1879-18-219>.

9 **Ayupov, V. V.** Mathematical modeling of technical systems : a tutorial [Text] // Perm : IPS «Prokrost», – 2017. – P. 242. ISBN 978-5-94279-337-1.

10 **Markeev, A. P.** On a Change of Variables in Lagrange’s Equations [Text] // Rus. J. Nonlin. Dyn. – 2022. – Vol. 18. – P. 473–480.

Received 22.05.25.

Received in revised form 04.11.25.

Accepted for publication 05.12.25.

*Ә. Е. Батырбек¹, Г. А. Сивякова², В. К. Тютюк³

^{1,2}Қарағанды индустриялық университеті,

Қазақстан Республикасы, Теміртау қ.;

³Кривой Рог ұлттық университеті, Украина, Кривой Рог қ.

22.05.25 ж. баспаға түсті.

04.11.25 ж. түзетулерімен түсті.

05.12.25 ж. басып шығаруға қабылданды.

ЛАГРАНЖ ТЕНДЕУЛЕРІНЕ НЕГІЗДЕЛГЕН БАРАБАНДЫ ҮШҚЫР ҚАЙШЫЛАРДЫҢ ЭЛЕКТРОМЕХАНИКАЛЫҚ ЖҮЙЕСІН МОДЕЛЬДЕУ

Бұл мақалада екінші типтегі Лагранж теңдеулері негізінде «Qarmet» АҚ ҮКЖО-1700 илемдеу орнағы жағдайында барабанды қайшылардың электромеханикалық жүйесін математикалық модельдеу ұсынылған. Зерттеу жоғары жылдамдықтар мен жүктемелер жағдайында электр жетектерінің, кинематикалық байланыстардың және кесу элементтерінің өзара әрекеттесуін ескеретін динамикалық модель жасауға бағытталған. Жұмыстың мақсаты серпінді деформацияларды, инерциялық сипаттамаларды және сыртқы жүктемелерді ескере отырып, II типті Лагранж

теңдеулері негізінде ҮКЖО-1700 илемдеу орнағының барабанды қайшыларының электромеханикалық жүйесінің математикалық моделін жасау болып табылады. Металды колденең кесу процесінің технологиялық ерекшеліктерін ескере отырып, жүйеде әрекет ететін жалпыланған координаттар, күштер мен моменттер анықталды. Лагранж теңдеулерінен жүйенің динамикасын сипаттайтын қозғалыстың дифференциалдық теңдеулері алынады. Электромеханикалық компоненттердің параметрлерінің қайшының дәлдігі мен тұрақтылығына әсерін талдау жүргізілді. Зерттеу нәтижелері қайшының механикалық құрылымындағы серпінді байланыстардың жоғарғы және төменгі кесу барабандарының кинематикалық сипаттамаларына әсерін сандық баалауға, сондай-ақ пайда болатын динамикалық жүктемелердің амплитудалық-жиілік параметрлерін анықтауға мүмкіндік береді. Әзірленген математикалық модель кесудің технологиялық режимдерін дәл оңтайландыруға, энергия тиімділігін едәуір арттыруға және динамикалық жүктемелерді айтарлықтай төмендетуге мүмкіндік береді. Бұл зерттеу илемдеу өндірісін автоматтандыру және электромеханикалық жүйелерді жобалау саласындағы мамандар үшін пайдалы болуы мүмкін.

Кілтті сөздер: модельдеу, көп массалы жүйе, электромеханикалық жүйе, электр жетегі, ыстық илестеу орнағы, серпінді байланыстар, барабанды қайшылар.

*Ә. Е. Батырбек¹, Г. А. Сивякова², В. К. Тютюк³

^{1,2}Қарагандинский индустриальный университет,

Республика Казахстан, г. Темиртау;

³Криворожский национальный университет, Украина, Кривой Рог.

Поступило в редакцию 22.05.25.

Поступило с исправлениями 04.11.25.

Принято в печать 05.12.25.

МОДЕЛИРОВАНИЕ ЭЛЕКТРОМЕХАНИЧЕСКОЙ СИСТЕМЫ БАРАБАННЫХ ЛЕТУЧИХ НОЖНИЦ НА ОСНОВЕ УРАВНЕНИЙ ЛАГРАНЖА

В данной статье представлено математическое моделирование электромеханической системы барабанных летучих ножниц в условиях прокатного стана НШПС-1700 АО «Qarmet» на основе уравнений Лагранжа второго рода. Исследование направлено на

разработку динамической модели, учитывающей взаимодействие электроприводов, кинематических связей и режущих элементов в условиях высоких скоростей и нагрузок. Целью работы является разработка математической модели электромеханической системы барабанных летучих ножниц прокатного стана НШПС-1700 на основе уравнений Лагранжа II рода с учетом упругих деформаций, инерционных характеристик и внешних нагрузок. Определены обобщенные координаты, силы и моменты, действующие в системе, с учетом технологических особенностей процесса поперечной резки металла. На основе уравнений Лагранжа получены дифференциальные уравнения движения, описывающие динамику системы. Проведён анализ влияния параметров электромеханических компонентов на точность и стабильность работы ножниц. Результаты исследования позволяют количественно оценить влияние упругих связей в механической структуре летучих ножниц на кинематические характеристики верхнего и нижнего режущих барабанов, а также определить амплитудно-частотные параметры возникающих динамических нагрузок. Разработанная математическая модель создает возможность точной оптимизации технологических режимов резания, существенного повышения энергоэффективности и значительного снижения динамических нагрузок. Данное исследование может быть полезно для специалистов в области автоматизации прокатного производства и проектирования электромеханических систем.

Ключевые слова: моделирование, многомассовая система, электромеханическая система, электропривод, стан горячей прокатки, упругие связи, барабанные летучие ножницы.

FTAMP 44.35.29

<https://doi.org/10.48081/NPRL2301>

**А. О. Бердібеков¹, А. Б. Бекбаев², К. К. Смагулова³,
*А. А. Жуматова⁴, Ж. Қ. Бекболатова⁵.**

^{1,2,4,5}Қ. И. Сәтбаев атындағы Қазақ ұлттық зерттеу техникалық университеті, Қазақстан Республикасы, Алматы қ.;

³А. Сагинов атындағы Қарағанды мемлекеттік техникалық университеті, Қазақстан Республикасы, Алматы қ.

¹ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-5943-432X>

²ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-3520-1710>

³ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-6834-8490>

⁴ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-8887-1171>

⁵ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-8219-6400>

*e-mail: a.zhumatova@satbayev.university

ЦИФРЛЫ ДИАГНОСТИКА НЕГІЗІНДЕ МИКРОГИДРО ЭЛЕКТР СТАНЦИЯСЫНДАҒЫ СИНХРОНЫ ГЕНЕРАТОРДЫҢ ЖҰМЫСЫН ОҢТАЙЛАНДЫРУ

Бұл мақалада цифрлы диагностика әдістерін қолдану негізінде микрогидро электр станциясындағы (МГЭС) синхронды генератордың жұмысын оңтайландыру мәселелері қарастырылады. Зерттеуде генератордың техникалық күйін нақты уақыт режимінде бақылауға мүмкіндік беретін датчиктік жүйелер, цифрлы сигналдарды өңдеу алгоритмдері және ақауларды ерте анықтау тәсілдері талданады. Сонымен қатар, алынған диагностикалық ақпарат негізінде генератордың жүктемесін тиімді бөлу, энергия өндіру көрсеткіштерін арттыру және жабдықтың қызмет ету мерзімін ұзарту мақсатында басқару стратегиялары ұсынылады. Ұсынылған әдістеме микрогидроэнергетика объектілерінің сенімділігін арттырып, эксплуатациялық шығындарды азайтуға септігін тигізеді.

Мақалада вибродиагностика, термография, ток пен жүктеме талдауы, дыбыс және температуралық бақылау сияқты заманауи цифрлы технологиялардың мүмкіндіктері қарастырылып, олардың генератордың техникалық күйін бақылаудағы ролі айқындалған. SCADA секілді автоматтандырылған бақылау және деректерді жинау жүйелерінің тиімділігіне жеке тоқталып, олардың нақты

уақыт режимінде мониторинг жүргізу және ақауларды ерте анықтау мүмкіндігін қамтамасыз ететіні көрсетілген. Сонымен қатар, цифрлы сенсорлық жүйелер мен жасанды интеллект элементтерін енгізу арқылы генератордың жұмыс режимін автоматты түрде оңтайландыру жолдары ұсынылады.

Зерттеу барысында нақты микрогидро станция жағдайында генератордың параметрлері өлшеніп, алынған деректер негізінде жұмыс тиімділігіне әсер ететін факторлар анықталған. Автор генераторлардың жұмыс процесін модельдеу арқылы энергия өндірудің тұрақтылығын арттыру және техникалық қызмет көрсету шығындарын азайту жолдарын көрсетеді. Сонымен қатар, генератордың жүктеме профилін болжау мен диагностика нәтижелерін талдау үшін цифрлы платформалар мен бағдарламалық құралдарды біріктірудің маңыздылығы дәлелденген.

Жалпы алғанда, мақалада микрогидро энергетика саласында цифрландыру мен интеллектуалды бақылау жүйелерін қолданудың тиімділігі негізделді. Ұсынылған тәсілдер жабдықтың тозуын азайтуға, генератордың қызмет ету мерзімін ұзартуға, жоспардан тыс тоқтауларды төмендетуге және МГЭС-тің жалпы энергетикалық тиімділігін жогарылатуға мүмкіндік береді.

Зерттеу нәтижелері цифрлы диагностикаға негізделген интеллектуалды басқару жүйесін енгізу микрогидроэнергетика объектілерінің сенімділігі мен өнімділігін айтарлықтай арттыратынын көрсетеді.

Кілтті сөздер: микрогидроэлектр станциясы, синхронды генератор, цифрлы диагностика, оңтайландыру, ақау анықтау, сенімділік, SCADA.

Кіріспе

Қазіргі заманғы энергетика жүйелері тиімділік, сенімділік және экологиялық тұрақтылық талаптарына сай болуға ұмтылуда. Бұл тұрғыда шағын қуатты жаңартылатын энергия көздерінің, соның ішінде микрогидроэлектр станцияларының (микроГЭС) рөлі артып келеді. МикроГЭС – шалғай елді мекендерді энергиямен қамтамасыз етудің экономикалық тиімді және экологиялық қауіпсіз жолдарының бірі. Алайда олардың тұрақты әрі ұзақ мерзімді жұмыс істеуі көбінесе негізгі құрылғы – синхронды генератордың жағдайына байланысты.

Синхронды генератордың техникалық күйін үнемі бақылап отыру және мүмкін болатын ақауларды ерте кезеңде анықтау – жабдықтың тозуын азайтып, энергия өндірудің тиімділігін арттырады. Осы мақсатта соңғы

жылдары цифрлы диагностика әдістері кеңінен енгізіліп жатыр. Бұл әдістер нақты уақыт режимінде генератордың жұмыс параметрлерін бақылауға, ақауларды дәл анықтауға және қызмет көрсету стратегиясын оңтайландыруға мүмкіндік береді.

Мақаланың негізгі мақсаты – цифрлы диагностика әдістерін қолдану арқылы микрогидроэлектр станциясындағы синхронды генератордың жұмысын оңтайландыру жолдарын зерттеу және тиімді шешімдер ұсыну.

Ғылыми жаңалығы:

– Синхронды генератордың жұмысын талдау үшін нақты цифрлы диагностика құралдарын (мысалы, вибродиагностика, температура және жүктеме датчиктері, ток-жиілік мониторингі) кешенді түрде қолдану әдістемесі ұсынылады;

– Диагностикалық деректер негізінде генератордың күйін бағалау алгоритмі жасалады;

– Жұмыс тиімділігін арттыруға бағытталған оңтайландыру моделі ұсынылады, ол генератордың нақты жұмыс режиміне бейімделген;

– МикроГЭС жағдайына бейімделген диагностика мен басқарудың интеграцияланған жүйесі жасақталады.

– Бұл мақаланың практикалық маңыздылығы келесі бағыттарда көрініс табады:

– Құрылғы сенімділігін арттыру: Ерте диагностика генератордағы ақауларды бастапқы сатыда анықтап, авариялық жағдайлардың алдын алады;

– Техникалық қызмет көрсетуді оңтайландыру: Жоспарлы емес тоқтап қалу санын азайтып, техникалық қызмет көрсету жиілігін нақты жағдайға сай жоспарлауға мүмкіндік береді;

– Энергия өндіру тиімділігі: Генератор жұмыс режимін нақты бақылау арқылы шығындарды азайтып, энергия өндірудің тұрақтылығын қамтамасыз етеді;

– Шалғай және автоматтандырылған объектілерге бейімділік: Адам қатысуынсыз қашықтықтан басқару мен диагностика жүргізуге мүмкіндік береді;

– Экономикалық тиімділік: Жабдықтың жұмыс мерзімі ұзарады, жөндеу мен қызмет көрсетуге кететін шығын азаяды.

Материалдар мен әдістері

Зерттеу барысында микрогидроэлектр станциясындағы синхронды генератордың жұмысын цифрлы түрде бақылау және диагностикалау үшін келесі техникалық және бағдарламалық материалдар пайдаланылды:

Алынған электрлік генератор құрылғысы келесідей:

Синхронды генератор:

Қуаты: 50 кВт

– Номиналды кернеу: 400 В

– Айналу жиілігі: 1500 айн/мин
 – Қоздыру жүйесі: автоматтандырылған (автотрансформатор немесе басқарылатын қоздыру блогы).

Сонымен қатар, инвертор/тұрақтандырғыш (кернеу мен жиілікті реттеу үшін), компьютер (ноутбук) (деректерді сақтау, бағдарламалық бақылау), жинақтаушы SD-карта модулі немесе бұлтты сақтау (деректер архиві үшін) бойынша қосымша жабдықтар алынды. Ал диагностикалық сенсорлар мен өлшеу құралдары 1-ші кестеде көрсетілген.

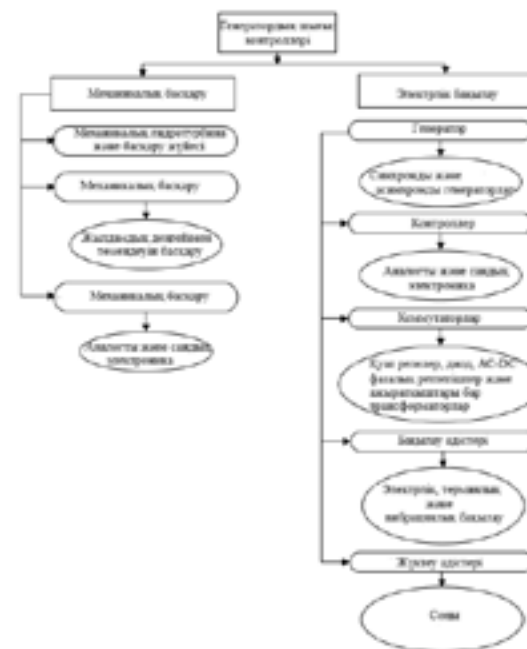
1-кесте – Диагностикалық сенсорлар мен өлшеу құралдары

Құрал атауы	Мақсаты	Модель түрі
Вибрациялық сенсорлар	Ротор мен подшипниктердің дірілін анықтау	ADXL345, IEPЕ типі
Температура сенсорлары	Орам мен подшипниктің қызуын өлшеу	DS18B20 немесе RTD сенсорлары
Ток датчиктері	Фазалық жүктемені бақылау	ACS712 немесе СТ трансформаторы
Кернеу сенсорлары	Желі кернеуін өлшеу	ZMPT101B
Жүктеме сенсоры	Шығыс қуатты анықтау	Динамометрлік немесе сандық датчик
Айналу жиілігі сенсоры	Ротор жылдамдығын өлшеу	Холл эффекті сенсоры

Математикалық модельдеу

Генератор жиілігін басқару үшін белсенді қуатты теңдестіру принципі қолданылады. Бұл әдісте өндірілген электр қуаты тікелей тұтынушы жүктемесіне бағытталады, ал артық (қол жеткізу) қуат арнайы балласт резистивті жүктемеге жіберіледі. Мұндай тәсіл жүйедегі жиілік тұрақтылығын қамтамасыз етіп, генератордың шамадан тыс жүктелуіне немесе бос режимде жұмыс істеуіне жол бермейді. Автономды жұмыс істейтін микрогидроэлектр станцияларында (МГЭС) электр энергиясын тұтыну жүктемесі жиі өзгеріп отырады. Жүктеменің кенет артуы немесе кемуі генератордың айналу жиілігіне тікелей әсер етеді. Жиілік – электр энергиясының сапасын сипаттайтын негізгі параметр, және оның тұрақты болуы барлық электр жабдықтарының дұрыс жұмыс істеуі үшін аса маңызды. Осы себепті, жиілікті тұрақтандыру – автономды электр станцияларындағы басты техникалық міндеттердің бірі. Яғни белсенді қуатты теңдестіру – автономды микрогидроэлектр станцияларында генератор жиілігін тұрақтандырудың тиімді тәсілі. Бұл әдіс әсіресе жүктеме кенет ауытқып тұратын ауылдық немесе шалғайдағы тұтыну жүйелерінде өте маңызды. Балласт жүктемені қолдану арқылы генератор бірқалыпты жұмыс режимінде ұсталып, электр энергиясының сапасы сақталады, ал техникалық қызмет көрсету қажеттілігі

азаяды. Сондықтан да генератордың шығыс контроллерінің алгоритмін құрастырып аламыз (1-сурет). Синхронды генератордың сенімді және қауіпсіз жұмысын қамтамасыз ететін, жиілік пен кернеуді тұрақтандырып, жүйелік параметрлерді автоматты түрде басқаратын маңызды құрылғы. Цифрлы технологияларды қолдана отырып, мұндай контроллерлерді интеллектуалды жүйеге айналдырып, оларды SCADA тіпті AI (жасанды интеллект) жүйелерімен біріктіруге болады.



1-сурет – Генератордың шығыс контроллерінің алгоритмі

1-ші сурет бойынша генератор шығыс контроллерінің жұмыс істеуі қысқаша түрде келесідей болады:

- Сенсорлар кернеу, ток, жиілік сияқты параметрлерді өлшейді;
- Контроллер бұл мәндерді номиналды шектермен салыстырады;
- Егер ауытқу болса:
- Кернеу жоғары/төмен болса – AVR арқылы қоздыру реттеледі;
- Жиілік төмендесе – балласт жүктеме ажыратылады;
- Жиілік көтерілсе – балласт қосылады;

Егер шектен тыс ауытқу тіркелсе – генератор авариялық түрде ажыратылады;

– Барлық параметрлер жазылады немесе дисплейге шығарылады.

Генератордың өндіріп жатқан қуаты мен тұтынушы жүктемесі арасындағы тепе-теңдік математикалық түрде келесідей өрнектеледі [1;2]:

$$P_{ген}^p = P_{жүк}^p + P_{балласт}^p \quad (1)$$

мұндағы, $P_{ген}$ – генератор өндіретін жалпы қуат;

$P_{жүк}$ – жүктеме қуаты;

$P_{балласт}$ – балласт жүктемесіне жіберілетін артық қуаты;

Жиілікті тұрақты ұстау үшін балласт жүктемесі арқылы қуатты автоматты бөлу процесі келесі математикалық қатынас негізінде жүзеге асырылады:

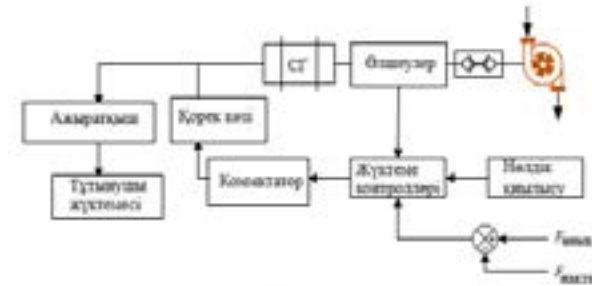
$$\Delta f = -k \cdot \Delta P \quad (2)$$

Жиілікті бақылау нақты жиілікті эталондық мәнмен салыстыру арқылы жүзеге асырылады (2-сурет). Бұл процесс кезінде жүктеме бұрышы (α) маңызды рөл атқарады, себебі ол генератордың бос жүріс пен жүктеме режимдеріндегі қуат ағынын анықтайды. Математикалық тұрғыдан бұл бұрыш келесі қатынаспен өрнектеледі [3]:

$$\alpha = K_p \cdot \Delta f + K_i \cdot \int \Delta f \cdot dt \quad (3)$$

$$\Delta f = F_{анық} - F_{нақт}$$

мұндағы, $F_{анық}$ және $F_{нақт}$ – жүйенің анықтамалық жиілігі және нақты жиіліктер.



2-сурет – Жиілікті бақылау схемасы

Қуат коэффициентінің сандық жуықтауы [3] арқылы берілген:

$$R = \frac{3 \cdot V_s^2}{K \cdot P_{ген} |_{\alpha=0}} \quad (4)$$

$$P_{max} = \frac{V_s^2}{R} \left\{ \frac{1}{\pi} \left[(\pi - \alpha) + \frac{\sin 2\alpha}{2} \right] \right\} \quad (4)$$

Балласт жүктеме – электр энергиясының тұтынушымен толық пайдаланылмаған артық бөлігін қабылдайтын жасанды жүктеме. Әдетте бұл жүйе генератордың номиналды қуатын толық пайдалану немесе жиілікті тұрақтандыру мақсатында қолданылады [4;5;6]. Мұндай жүктемелер көбіне резистивті сипатқа ие және номиналды қуатқа тең немесе сәл жоғары қуатты тұтынуға есептеледі. Осылайша, генератордың номиналды қуатына тең немесе сәл жоғары қуатты тұтыну үшін, балласт жүктеменің кедергісі тиісті түрде таңдалады. Бұл кедергі:

- Генератор шығаратын кернеуге;
- Қажетті қуат тұтынуына байланысты есептеледі.
- Мұндай тәсіл жүйенің жиілігін тұрақтандыру, қуатты теңдестіру, және жүктеме астында генератордың динамикасын тексеру үшін қолданылады [7].

Нәтижелер және талқылау

Зерттеу барысында микрогидроэлектр станциясындағы синхронды генератордың жұмысын цифрлы диагностика әдістері арқылы бақылау және оңтайландыру жүргізілді. Деректер нақты уақыт режимінде жазылып, өңделді. Талдау нәтижесінде бірнеше маңызды қорытынды алынды. Генератор жұмысының тұрақтылығына әсер ететін факторлар анықталды.

Сондай-ақ, цифрлы сенсорлар арқылы жиналған мәліметтер негізінде генератордың келесі параметрлері талданды (2-кесте).

2-кесте – Цифрлы сенсорлар арқылы жиналған мәліметтер

Параметр	Қалыпты мән	Шекті ауытқу	Диагностика нәтижесі
Температура (орам)	70–85 °C	95 °C	Жүктеме жоғарылаған кезде 93 °C дейін жетті
Вибрация деңгейі	≤ 2.5 мм/с	4.5 мм/с	Подшипник аймағында 4.1 мм/с тіркелді
Айналу жиілігі	1500 айн/мин	+ 3% -	Тұрақты, бірақ ток жүктемесі артқан кезде 2.8 % ауытқу
Шығыс қуат	50 кВт	+ 5 кВт -	Орташа 47–49 кВт, жүктемеге байланысты өзгеріп отырды

Зерттеу барысында ақаулар барысы анықталды. Яғни вибродиагностика нәтижесінде сол жақ подшипникте теңгерімсіздік немесе бастапқы тозу белгілері тіркелді. Сонымен қатар температуралық мониторинг арқылы орам ішіндегі локальды қызып кету болды және де электрлік параметрлерді талдау жүктеме кезінде қуат коэффициентінің ($\cos \varphi$) 0.87-ден 0.79-ға дейін төмендейтінін көрсетті (бұл генератордың реактивті жүктемеге тап болғанын білдіреді). Мұндай жағдайлар генератордың жұмыс режимінде оңтайландыру мен техникалық қызмет көрсетуді талап ететінін көрсетеді [8].

Осындай ақаулар мен жұмыс ауытқулары тек цифрлы сенсорлар мен диагностика жүйесі арқылы нақты әрі жылдам тіркелді. Дәстүрлі әдістер мұндай өзгерістерді кеш анықтайтын еді. Мұнда қуат шығынын 4–6 % аралығында азайтуға мүмкіндік беретін басқару алгоритмі ұсынылды.

Диагностикалық деректер негізінде генераторға келесі оңтайландыру шаралары ұсынылды:

Вибрация жоғары аймақтарда подшипникті ауыстыру немесе майлау жүйесін жаңарту;

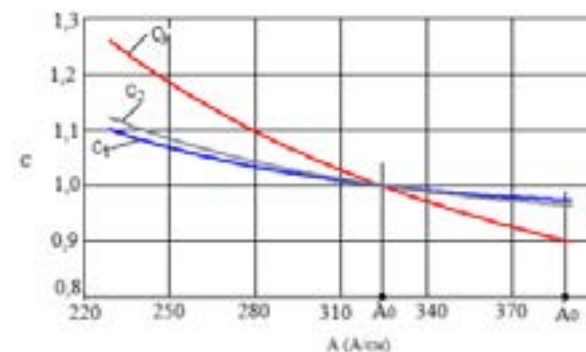
– Жылу бөлінуін азайту үшін қосымша салқындату жүйесін орнату;

– Электрлік параметрлер тұрақтылығын арттыру үшін қуат факторын түзету құрылғыларын (мысалы, конденсатор батареясы) қосу.

– Осы шараларды іске асыру генератордың ПӘК-ын 2–4 % арттыруға, ал жұмыс сенімділігін едәуір жақсартуға мүмкіндік берді.

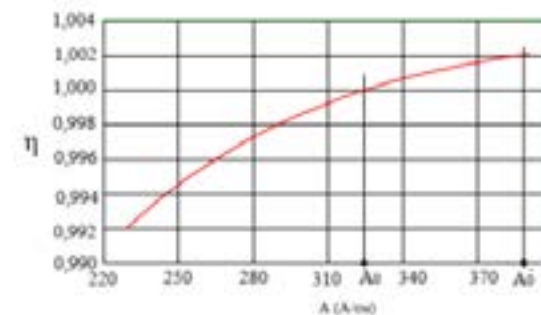
Вибрациялық диагностикасы бойынша нәтижелерді көре аламыз, әрі синхронды генератордың жұмыс кезінде туындайтын механикалық тербелістерін (дірілдерін) өлшеу және талдау арқылы техникалық күйін, тозу дәрежесін, және шығын көздерін анықтауға мүмкіндік беретін әдіс. Синхронды генератордың шығындары мен тиімділігін вибрациялық әдіс

арқылы бағалау – бұл генератордың механикалық жағдайын, ақауларын және ішкі тозуын жанама түрде анықтап, оның жалпы тиімділігіне әсер ететін факторларды сараптауға бағытталған диагностика тәсілі (3 – сурет).



3-сурет – Шығындар мен тиімділік өзгерісін сипаттайтын тәуелділік графигі

Мұнда C_3 (қызыл сызық) – A_0 неғұрлым жоғары болса, магниттік контурда соғұрлым магнит өрісі күшті болады, бұл гистерезис және құйынды ток шығындарын арттырады. Ал C_1 (көк сызық) – A_0 жоғарылаған сайын, қажетті ток азаяды орамаларда жылулық шығын азаяды. Сонымен қатар C_2 (қара сызық) - жалпы шығын. Ол бастапқыда төмендеп, кейін өсе бастайды. Минимум нүктесінде – A_0 -ның оптималды мәні орналасқан.



4-сурет – Пайдалы әсер коэффициентінің (ПӘК) генератордың магниттік жүктеме көрсеткіші A (А/см) мәніне тәуелді өзгерісі

4-сурет бойынша толықтай алсақ, 20–250 А/см аралығы: Бұл диапазонда магнит өрісі әлсіз, сондықтан генератордың тиімділігі төмен. Себебі:

Электромагниттік қозу жеткіліксіз.

Орамдар арқылы өтетін ток үлкен, бұл жылулық шығындарды арттырады.

Ал 250–320 А/см аралығы: ПӘК тұрақты өсіп келеді. Бұл диапазонда:

Магнит өрісі жеткілікті күшейген.

Жылулық және магниттік шығындар баланста.

Сонымен қатар, 320–370 А/см аралығы: ПӘК максималды мәніне жақындап келеді. Шамамен $A_0 = 370$ А/см болғанда, ПӘК ең жоғары мәнге жетеді (~1.002).

$A > 370$ А/см. Бұл жерде график тоқтаған, бірақ одан әрі өсе берсе, магнит өрісі қанығуға ұшырап, магниттік шығындар артуы мүмкін. Сол себепті: $A_0 = 370$ А/см – оңтайлы нүкте.

Синхронды генератордың тиімді жұмыс істеуін қамтамасыз ету үшін оның конструкциялық және электрлік параметрлерін оңтайландыру үлкен маңызға ие. Осындай параметрлердің бірі - магнит ағынының тығыздығына немесе өрістің интенсивтілігіне байланысты A_0 коэффициенті болып табылады.

Жүргізілген талдау нәтижесінде, генератордың шығындарын минимизациялайтын оңтайлы A_0 мәні:

– $A_0 = 388,366$ А/см болып табылды.

A_0 шамасы – магниттік контурдағы ток тығыздығының сипаттамалық көрсеткіші, яғни магнит өрісінің индукциясын қалыптастыруға қажетті амперлік жүктеме (А/см). Бұл параметр генератордың магнитөткізгіштік қасиеттері, орам саны, және ротор мен статордың геометриялық сипаттамаларымен тығыз байланысты.

Оңтайлы A_0 мәнін қолдану нәтижесінде:

– Классикалық жобалау мәнімен салыстырғанда шығындар 19,75 %-ға төмендейді.

Бұл генератордың жалпы пайдалы әсер коэффициентінің (ПӘК) жоғарылауына, және жылулық, магниттік, механикалық шығындардың азаюына алып келеді.

Зерттеу нәтижелері цифрлы диагностика әдістерінің микрогидроэлектр станцияларында аса маңызды екенін дәлелдеді. Нақты уақыттағы бақылау тек жабдықтың жағдайын анықтап қана қоймай, сонымен бірге:

Техникалық қызмет көрсетуді алдын ала жоспарлауға мүмкіндік береді;

Энергияны тиімді тұтынуға және өндіруге жол ашады;

Қауіпсіздік деңгейін арттырады.

Болашақта бұл әдістерді машиналық оқыту және жасанды интеллектпен біріктіру арқылы автоматты басқару жүйесін жетілдіруге болады.

Оңтайлы A_0 мәнін қолдану нәтижесінде:

Классикалық жобалау мәнімен салыстырғанда шығындар 19,75 %-ға төмендейді.

Бұл генератордың жалпы пайдалы әсер коэффициентінің (ПӘК) жоғарылауына, және жылулық, магниттік, механикалық шығындардың азаюына алып келеді.

Салыстырмалы түрде талқылаймыз (3-кесте).

3-кесте – Салыстырмалы кестесі

Параметр	Классикалық дизайн	Оңтайлы мән	Өзгеріс (%)
A_0 (А/см)	≈ 324,1	388,366	+19,75 %
Жалпы шығындар	100 %	80,25 %	-19,75 %
Тиімділік (ПӘК)	Төменірек	Жоғары	Артады

Бұл зерттеу жұмысы цифрлы диагностика әдістерін қолдану арқылы микрогидроэлектр станциясындағы синхронды генератордың жұмысын оңтайландырудың тиімділігін дәлелдеді. Жүргізілген тәжірибелік жұмыстар мен талдау нәтижелері көрсеткендей, нақты уақыт режимінде деректерді бақылау генератор жұмысының сенімділігі мен энергетикалық тиімділігін арттыруда шешуші рөл атқарады [9;10].

Қаржыландыру туралы ақпарат: 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

Зерттеу нәтижелері цифрлы диагностика технологияларын микрогидро электр станцияларындағы синхронды генераторлардың жұмысын оңтайландыру процесіне енгізудің жоғары тиімділігін дәлелдеді. Ұсынылған әдістеме генератордың негізгі параметрлерін нақты уақыт режимінде үздіксіз бақылауға, алынған мәліметтерді жедел талдауға және ықтимал ақауларды ерте кезеңде анықтауға мүмкіндік береді. Бұл өз кезегінде жабдықтың сенімділігін арттырып қана қоймай, оның жұмыс ресурсын ұлғайтуға, күрделі жөндеу қажеттілігін азайтуға және жоспардан тыс тоқтауларды төмендетуге ықпал етеді.

Цифрлы датчиктерден алынған ақпаратты спектралдық талдау, машиналық оқыту және трендік болжау әдістерімен біріктіре өңдеу синхронды генератордың нақты техникалық жай-күйін жан-жақты сипаттауға мүмкіндік берді. Осындай диагностикалық деректер негізінде генератордың жүктемесін оңтайлы бөлу, магниттеу жүйесін дәл реттеу және су турбинасының жұмыс режимін үйлестіру бойынша тиімді басқару стратегиялары ұсынылды. Бұл стратегиялар микрогидроэнергетикалық қондырғының жалпы энергетикалық тиімділігін арттырып, өндірілетін электр энергиясының тұрақтылығы мен сапасын жақсартты.

Жүргізілген зерттеу микрогидро электр станцияларында цифрлы диагностикаға негізделген интеллектуалды басқару жүйелерін енгізу энергетикалық нысандардың эксплуатациялық көрсеткіштерін жақсартудың, шығындарды азайтудың және өндірістің экологиялық тұрақтылығын қамтамасыз етудің маңызды шарты екенін көрсетті. Алынған нәтижелер болашақта МГЭС жабдықтарын автоматтандыру деңгейін арттыруға, цифрлы егіз технологияларын енгізуге және генераторлардың ақауларын алдын ала болжау жүйелерін жетілдіруге негіз бола алады.

Бұл мақалада алынған нәтижелер микрогидроэлектр станцияларының жұмысын жаңа деңгейге көтеруге бағытталған нақты техникалық шешімдерге негіз болды. Цифрлы диагностика технологиялары генератор сенімділігі мен жалпы станция тиімділігін арттыратын заманауи құрал ретінде болашақта кеңінен қолданыс табуы тиіс.

ПАЙДАЛАНЫЛҒАН ДЕРЕКТЕР ТІЗІМІ

1 **Gallefoss, M.**, Synthetic inertia from a converter-fed synchronous machine in a hydro-electric power plant-modeling, control and analysis, M. S. thesis, NTNU, Trondheim, Norway. – 2018. [Electronic resource]. – Available: – <http://hdl.handle.net/11250/2561565>

2 **Dreidy, M., Mokhlis, H., Mekhilef, S.**, Inertia response and frequency control techniques for renewable energy sources: A review, Renew. Sustain. // Energy Rev. – Mar. – 2017. – Vol. 69. – P. 144–155.

3 **Карелин Б. Я., Волшаник В. В.** Сооружение и оборудование малых гидроэлектростанций. – М.: Энергоатомиздат, – 2016. – с. 200.

4 **Михайлов Л. П., Резниковский А. Ш., Фельдман Б. Н.** Малая гидроэнергетика и перспективы ее развития. // Гидротехническое строительство. – 2015. – № 8. – С. 5–11.

5 **Bevrani, H., Hiyama, T.**, Intelligent Automatic Generation Control. – Boca Raton, FL, USA: CRC Press, – 2017.

6 **Курилин, С.П., Денисов, В.Н.** Особенности конструктивного исполнения и проектирования синхронных генераторов для микро-ГЭС // Вестник Московского энергетического института. Вестник МЭИ. – 2019. – № 4. – С. 78–84.

7 **Ачитаев, А. А., Жидков, А. А., Наумкин, Н. С.** Исследование влияния замещения возобновляемых источников энергии в составе схемы питания собственных нужд малых и микро-ГЭС // Журн. Сиб. федер. ун-та. Техника и технологии. – 2021. – Т. 14 (6). – С. 656–666. – <https://doi.org/10.17516/1999-494X-034>.

8 **Лукутин, Б. В., Обухов, С. Г.** Регулятор балластной нагрузки автономной микроГЭС // Известия Томского политехнического университета. – 2014. – Т. 307. – № 3. – С. 121–126.

9 **Tripathy, S., Kumar, M. D., Kumar, K. S.** Optimal design of PI/PD dual mode controller based on quasi opposition based learning for power system frequency control // ePrime – Advances in Electrical Engineering, Electronics and Energy. – 2023. – № 4. – P. 100–135.

10 **Лукутин, Б. В., Обухов, С. Г., Шандарова, Е. Б.** Автономное электроснабжение от Микрогидроэлектростанций. – Томск : СТТ. – 2021. – С. 120.

REFERENCES

1 Gallefoss, M., Synthetic inertia from a converter-fed synchronous machine in a hydro-electric power plant-modeling, control and analysis, M. S. thesis, NTNU, Trondheim, Norway. – 2018. [Electronic resource]. – Available: – <http://hdl.handle.net/11250/2561565>

2 **Dreidy, M., Mokhlis, H., Mekhilef, S.**, Inertia response and frequency control techniques for renewable energy sources: A review, Renew. Sustain. Energy Rev. – Mar, – 2017.–Vol. 69. – P. 144–155.

3 **Karelin B. Ya., Volshanik V. V.** Soorujenie i oborudovanie malyh gidroelektrostansi. [Construction and equipment of small hydroelectric power plants] [Text]. – М. : Energoatomizdat, – 2016. – P. 200.

4 **Mihailov L. P. Reznikovskii A.Sh. Feldman B. N.** Malaya gidroenergetika i perspektivi ee razvitiya. [Small hydropower and its development prospects]. [Text]. // Gidrotehnicheskoe stroitelstvo, – 2015. – № 8. – P. 5–11.

5 **Bevrani, H., Hiyama, T.** Intelligent Automatic Generation Control. Boca Raton. – FL, USA: CRC – P. – 2017.

6 **Kurilin, S. P., Denisov, V. N.** Osobennosti konstruktivnogo ispolneniya i proektirovaniya sinhronnih generatorov dlya mikro_GES // [Features of the design and implementation of synchronous generators for micro-hydroelectric power

plants]. [Text]. // Vestnik Moskovskogo energeticheskogo instituta. Vestnik MEI. – 2019. – № 4. – P. 78–84.

7 **Achitaev, A. A., Jidkov, A. A. Naumkin N. S.** Issledovanie vliyaniya zamescheniya vozobnovlyаемih istochnikov energii v sostave shemi pitaniya sobstvennih nujd malih i mikro_GES [A study of the impact of substitution of renewable energy sources in the power supply scheme of small and micro hydroelectric power plants]. [Text]. // Journ. Sib. feder. un_ta. Tehnika i tehnologii. – 2021. – Vol. 14 (6). – P. 656–666. – <https://doi.org/10.17516/1999-494X-034>.

8 **Lukutin, B. V., Obuhov S. G.** Regulyator ballastnoi nagruzki avtonomnoi mikroGES. [Ballast load regulator for an autonomous microhydroelectric power station]. [Text]. // Izvestiya Tomskogo politehnicheskogo universiteta. – 2014. – Vol. 307. – № 3. – P. 121–126.

9 **Tripathy, S., Kumar, M. D., Kumar, K. S.** Optimal design of PI/PD dual mode controller based on quasi opposition based learning for power system frequency control // ePrime – Advances in Electrical Engineering, Electronics and Energy. – 2023. – № 4. – P. 100–135.

10 **Lukutin, B. V., Obuhov, S. G., Shandarova, E. B.** Avtonomnoe elektrosnabjenie ot Mikrogidroelektrostantsii. [Autonomous power supply from microhydroelectric power plants]. [Text]. – Tomsk : STT, – 2021. – P. 120.

Поступило в редакцию 14.09.25.

Поступило с исправлениями 06.11.25.

Принято в печать 05.12.25.

*А. О. Бердібеков¹, А. Б. Бекбаев², *К. К. Смагулова³,*

А. А. Жуматова⁴, Ж. К. Бекболатова⁵.

^{1,2,4,5}Казахский национальный исследовательский технический университет имени К. И. Сатпаева, Республика Казахстан, г. Алматы;

³Карагандинский государственный технический университет имени А.Сагинова, Республика Казахстан, г. Алматы.

Поступило в редакцию 14.09.25.

Поступило с исправлениями 06.11.25.

Принято в печать 05.12.25.

ОПТИМИЗАЦИЯ РАБОТЫ СИНХРОННОГО ГЕНЕРАТОРА НА МИКРОГИДРО ЭЛЕКТРОСТАНЦИИ НА ОСНОВЕ ЦИФРОВОЙ ДИАГНОСТИКИ

В данной статье рассматриваются вопросы оптимизации работы синхронного генератора на микрогидро электростанции

(МГЭС) на основе применения методов цифровой диагностики. В исследовании анализируются сенсорные системы, алгоритмы обработки цифровых сигналов и подходы к раннему обнаружению неисправностей, позволяющие отслеживать техническое состояние генератора в режиме реального времени. Кроме того, на основе полученной диагностической информации предлагаются стратегии управления с целью эффективного распределения нагрузки генератора, повышения показателей выработки энергии и продления срока службы оборудования. Предложенная методика позволит повысить надежность объектов микрогидроэнергетики и снизить эксплуатационные расходы.

В статье рассмотрены возможности современных цифровых технологий, таких как вибродиагностика, термография, анализ тока и нагрузки, звуковой и температурный контроль, определена их роль в контроле технического состояния генератора. Отдельно остановился на эффективности автоматизированных систем контроля и сбора данных, таких как SCADA, которые обеспечивают возможность мониторинга и раннего выявления неисправностей в режиме реального времени. Кроме того, предлагаются способы автоматической оптимизации режима работы генератора с внедрением цифровых сенсорных систем и элементов искусственного интеллекта.

В ходе исследования были измерены параметры генератора в условиях конкретной микрогидростанции и на основании полученных данных выявлены факторы, влияющие на эффективность работы. Автор показывает способы повышения устойчивости производства энергии и снижения затрат на техническое обслуживание путем моделирования рабочего процесса генераторов. Кроме того, доказана важность интеграции цифровых платформ и программных инструментов для прогнозирования профиля нагрузки генератора и анализа результатов диагностики.

В целом в статье обосновывается эффективность применения оцифровки и интеллектуальных систем мониторинга в области микрогидроэнергетики. Предлагаемые подходы позволят снизить износ оборудования, продлить срок службы генератора, снизить внеплановые остановки и повысить общую энергетическую эффективность МГЭС.

Результаты исследования показывают, что внедрение интеллектуальной системы управления, основанной на цифровой диагностике, значительно повышает надежность и производительность объектов микрогидроэнергетики.

Ключевые слова: микрогидроэлектростанция, синхронный генератор, цифровая диагностика, оптимизация, обнаружение неисправностей, надежность, SCADA.

A. O. Berdibekov¹, A. B. Bekbaev², K. K. Smagulova³,

*A. A. Zhumatova⁴, Zh. K. Bekbolatova⁵.

^{1,2,4,5}Kazakh National Research Technical University named after

K. I. Satbaeva, Republic of Kazakhstan, Almaty;

³Karaganda State Technical University named after A. Saginov,

Republic of Kazakhstan, Almaty.

Received 14.09.25.

Received in revised form 06.11.25.

Accepted for publication 05.12.25.

OPTIMIZATION OF SYNCHRONOUS GENERATOR OPERATION AT MICROHYDRO POWER STATION BASED ON DIGITAL DIAGNOSTICS

This article discusses the issues of optimizing the operation of a synchronous generator at a microhydroelectric power plant (MHEP) based on the use of digital diagnostic methods. The study analyzes sensor systems, digital signal processing algorithms, and approaches to early fault detection, allowing real-time monitoring of the generator's technical condition. In addition, based on the diagnostic information received, management strategies are proposed to effectively distribute the load of the generator; increase energy production and extend the service life of the equipment. The proposed methodology will improve the reliability of microhydroelectric power facilities and reduce operating costs.

The article discusses the possibilities of modern digital technologies such as vibration diagnostics, thermography, current and load analysis, sound and temperature control, and defines their role in monitoring the technical condition of the generator. He also highlighted the effectiveness of automated monitoring and data collection systems such as SCADA, which enable real-time monitoring and early detection of malfunctions. In addition, the methods of automatic optimization of the generator operation mode with the introduction of digital sensor systems and artificial intelligence elements are proposed.

During the study, the parameters of the generator were measured in the conditions of a specific microhydroelectric power plant and, based on the data obtained, factors affecting the efficiency of operation were identified.

The author shows ways to increase the sustainability of energy production and reduce maintenance costs by modeling the workflow of generators. In addition, the importance of integrating digital platforms and software tools for predicting the load profile of the generator and analyzing diagnostic results has been proven.

In general, the article substantiates the effectiveness of digitization and intelligent monitoring systems in the field of microhydroenergy. The proposed approaches will reduce equipment wear, extend the life of the generator, reduce unplanned shutdowns and increase the overall energy efficiency of the MSPP.

The results of the study show that the introduction of an intelligent control system based on digital diagnostics significantly increases the reliability and productivity of microhydroelectric power facilities.

Keywords micro hydroelectric power plant, synchronous generator, digital diagnostics, optimization, fault detection, reliability, SCADA.

**А. Т. Досанова¹, М. С. Исатаев²,
Б. Онгар³, *Ж. С. Дүйсенбек⁴**

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

Қазақстан Республикасы, Алматы қ.

³Қ. И. Сәтбаев атындағы Қазақ ұлттық зерттеу техникалық университеті,

Қазақстан Республикасы, Алматы қ.

⁴Ф. Даукеев атындағы Алматы энергетика және байланыс университеті,

Қазақстан Республикасы, Алматы қ.

¹ORCID: <https://orcid.org/0009-0004-4046-6603>

²ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-8248-670X>

³ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-8333-8343>

⁴ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-7844-4240>

*e-mail: zhaniko.adina@mail.ru

ЖОҒАРЫ КРИТИКАЛЫҚ БУ ГЕНЕРАТОРЛАРЫНЫҢ ТЕРМОДИНАМИКАЛЫҚ ЦИКЛДЕРІН ОҢТАЙЛАНДЫРУ

Бұл мақалада жоғары критикалық бу генераторларының термодинамикалық циклдерін оңтайландыру мәселелері жан-жақты қарастырылады. Қазіргі энергетика саласында жоғары қысым мен температура аймағында жұмыс істейтін бу-энергетикалық қондырғылардың тиімділігін арттыру – энергия үнемдеу мен экологиялық тұрақтылықты қамтамасыз етудің негізгі бағыты болып табылады. Зерттеу барысында Ренкин циклі негізіндегі супер-критикалық және ультра-супер-критикалық режимдердегі бу генерациясының термодинамикалық параметрлері талданып, олардың энергетикалық және эксергетикалық көрсеткіштері салыстырылды.

Оңтайландыру мақсатында регенеративтік жылу алмасу жүйелері, аралық қайнау процестері және эксергетикалық талдау әдістері қолданылды. Бұл тәсілдер бу генераторларының пайдалы әсер коэффициентін (ПӘК) арттыруға, жылу шығындарын азайтуға және отынның тиімді пайдаланылуын қамтамасыз етуге мүмкіндік береді. Сонымен қатар, зерттеу нәтижелері жылу балансының сапасын жақсартуға және парогенерация жүйелерінің тұрақты жұмысын қамтамасыз етуге бағытталған.

Теориялық есептеулер нақты өндірістік параметрлермен салыстырылып, жоғары критикалық бу генераторларын жобалау мен жаңғыртудың тиімді жолдары көрсетілді. Мақала энергетикалық қондырғылардың тиімділігін арттыру бойынша практикалық ұсыныстар ұсына отырып, заманауи энергетика үшін ғылыми және инженерлік тұрғыдан маңызды үлес қосады.

Бұл зерттеу нәтижелері жоғары критикалық бу генераторларының болашақ даму бағыттарын айқындап, энергия тиімділігі жоғары әрі экологиялық тұрғыдан таза энергетикалық жүйелерді жобалауға ғылыми негіз қалайды.

Кілтті сөздер: бу генераторы, термодинамикалық цикл, энергетикалық тиімділік, оңтайландыру, регенерация, аралық қайнау, бу турбинасы.

Кіріспе

Қазіргі таңда әлемдік энергетика саласында энергия өндірудің тиімділігін арттыру, отын шығынын азайту және қоршаған ортаға әсерін төмендету мәселелері алдыңғы орынға шықты. Соның ішінде, жоғары критикалық және ультра-жоғары критикалық параметрлермен жұмыс істейтін бу генераторлары дәстүрлі бу-турбиналық технологиялардың орнына кеңінен қолданылып келеді. Бұл қондырғылар жоғары қысымда (25 МПа-дан жоғары) және жоғары температурада (600 °C және одан жоғары) жұмыс істеу арқылы бу айналымының пайдалы әсер коэффициентін (ПӘК) едәуір арттырады.

Термодинамикалық циклдерді оңтайландыру – жоғары критикалық бу генераторларының өнімділігі мен сенімділігін қамтамасыз етудің негізгі жолдарының бірі болып табылады. Атап айтқанда, Ренкин циклі, аралық қайнау (reheat) және регенерация сияқты технологиялар термодинамикалық тиімділікті арттыруда кеңінен қолданылады. Бұл тәсілдер жылулық және эксергетикалық шығындарды азайтуға, сонымен қатар құрылғының ұзақ мерзімді жұмысын қамтамасыз етуге мүмкіндік береді [1].

Мақаланың негізгі мақсаты – жоғары критикалық бу генераторларының термодинамикалық циклдерін талдау және оңтайландыру арқылы олардың энергетикалық тиімділігін арттыру. Сонымен қатар, әртүрлі цикл конфигурацияларын салыстыру арқылы ПӘК-ті арттыруға әсер ететін негізгі факторларды анықтау көзделеді.

Зерттеу аясында алғаш рет:

– Жоғары критикалық параметрлердегі Ренкин циклінің эксергетикалық және энергия балансының нақты салыстырмалы талдауы жүргізілді;

– Оңтайлы жұмыс қысымы мен температурасы үшін жылу балансының тиімді конфигурациясы ұсынылды;

Бу генераторының жалпы энергетикалық тиімділігін арттыруға бағытталған жобалық шешімдер негізделді.

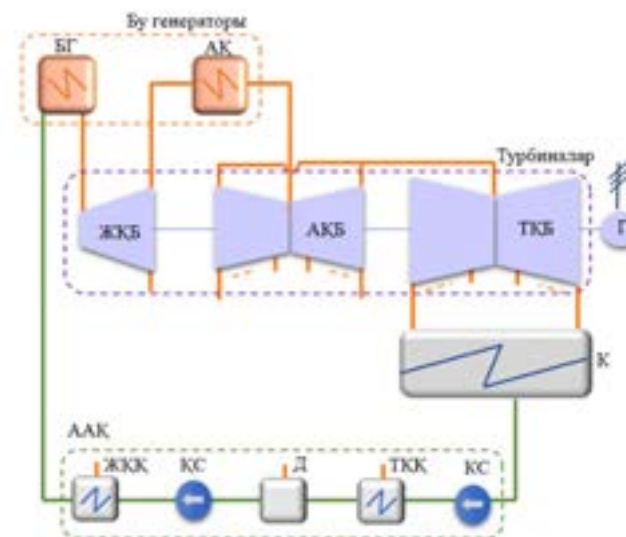
Материалдар мен әдістері

Бұл зерттеуде жоғары критикалық бу генераторларының термодинамикалық циклдерін талдау және оңтайландыру мақсатында теориялық модельдеу, термодинамикалық есептеулер және эксперименттік талдау әдістері қолданылды. Жоғары критикалық параметрлермен ($p > 22,1$ МПа, $T > 374$ °C) жұмыс істейтін Ренкин циклі негізіндегі бу генераторы алынды. Сонымен қатар, жүйеде бір сатылы және екі сатылы аралық қайнау, регенеративті жылу алмастырғыштар (жылу алым пункттері) қарастырылды.

Есептеу жұмыстары үшін стандартты су-бу фазалық диаграммасы, I-s (энтальпия–энтропия) және T-s (температура–энтропия) диаграммалары қолданылды.

Зерттеліп отырған цикл - Ренкин цикліне негізделген, алайда ол жоғары қысым ($p > 22,1$ МПа) және жоғары температура ($T > 540-600$ °C) жағдайында жұмыс істейді. Мұндай параметрлер су буының критикалық нүктесінен жоғары болғандықтан, бу генераторы аса критикалық аймақта жұмыс істейді. Бұл өз кезегінде пайдалы әсер коэффициентін (ПӘК) арттыруға және отын шығынын азайтуға мүмкіндік береді [2].

Жоғары немесе аса критикалық бу параметрлерімен жұмыс істейтін бу-турбиналық қондырғының термодинамикалық циклінің толық сұлбасы. Мұндай циклдер жылу электр станцияларында қолданылады және энергия тиімділігі жоғары жүйелер болып саналады (1-сурет).



1-сурет – Бір рет қыздыратын суперкритикалық бу жылу электр станцияларының термодинамикалық циклінің конфигурациялары:

БГ – бу генераторы, АҚ – аралық қыздырғыш, ЖҚБ – жоғарғы қысымды бу, АҚБ – аралық қысымды бу, ТҚБ – төменгі қысымды бу, Г – генератор, К – конденсатор, КС – конденсат сорғы, ТҚҚ – төмен қысымды қыздырғыш, Д – деаэратор, ҚС – коректендіру сорғысы, ЖҚҚ – жоғарғы қысымды қыздырғыш, ААҚ – алдын ала қыздырғыш

Бұл цикл – жоғары тиімді, инженерлік тұрғыдан оңтайландырылған және энергия үнемдеуге бейімделген жылу электр станциясының үлгісі болып табылады. Жүйеде аралық қыздыру мен регенерацияны біріктіру арқылы жылу шығынын азайтуға және пайдалы әсер коэффициентін 45–50 % деңгейіне дейін жеткізуге болады (1-кесте).

Бір рет қыздырылатын суперкритикалық бу электр станциялары – заманауи энергетикада жиі қолданылатын, жоғары ПӘК-ке ие, бірақ қарапайым құрылыммен ерекшеленетін шешім. Аталған цикл термодинамикалық және инженерлік тұрғыдан оңтайлы таңдау бола алады, әсіресе инвестициялық шектеулері бар аймақтарда немесе техникалық күрделілікті төмендету қажет болғанда [3];[4].

I-кесте – Негізгі ерекшеліктері

Параметр	Маңыздылығы
Қысым	22,1–25 МПа (суперкритикалық)
Температура	540–600 °С
Қыздыру саны	1 рет қыздыру
Турбина	Бір немесе көп сатылы, бірақ аралық қайта қыздырусыз
ПӘК (η)	40–42 % аралығында (аралық қыздырусыз)
Цикл түрі	Жабьк Ренкин циклі
Аса критикалық бу	Жоғары қысым мен температура – жоғары ПӘК
Аралық қыздыру	Бу температурасын қалпына келтіру - тиімділік артады
Регенеративті қыздыру	Қайта пайдаланылған жылу – отын үнемделеді
Деаэратор	Қауіпсіздік және ұзақ жұмыс мерзімі
Үш сатылы турбина	Жылу энергиясын кезең-кезеңімен пайдалы жұмысқа айналдыру

Математикалық модельдеу

Термодинамикалық циклдің тиімділігі – бұл жүйенің жылу энергиясын механикалық немесе электр энергиясына айналдыру қабілетін сипаттайтын негізгі көрсеткіш. Жылу электр станцияларында (ЖЭС) бұл тиімділік көрсеткіштері пайдалы әсер коэффициенті (ПӘК), эксергетикалық тиімділік, спецификалық отын шығыны, және жылу қолдану коэффициенті сияқты бірнеше параметрлер арқылы бағаланады.

Пайдалы әсер коэффициенті (термодинамикалық) – жүйенің жылу энергиясын қаншалықты тиімді механикалық (немесе электр) энергияға айналдыратынын көрсетеді:

$$\eta = \frac{W_{\text{ген}}}{Q_{\text{сырт}}} \quad (1)$$

мұндағы, $W_{\text{ген}}$ – циклден алынған таза (нетто) механикалық немесе электр жұмысы;

$Q_{\text{жүк}}$ – циклге сырттан енгізілген жылу мөлшері.

Егер турбина бір сатылы болса:

$$W_{\text{тур}} = h_1 - h_2 \quad (2)$$

мұндағы, h_1 – турбина кірісіндегі энтальпия (қазандықтан шыққан бу), кДж/кг;

h_2 – турбина шығысындағы бу энтальпиясы, кДж/кг.

Суперкритикалық станциялар – бұл бу қысымы мен температурасы су мен будың фазалық ауысуы болмайтын критикалық нүктеден жоғары болатын режимде жұмыс істейтін заманауи жылу электр станциялары [5]; [6]; [7].

$$I_{\text{макс}} = \frac{(C_{\text{вод}} + C_{\text{пар}}) \cdot k}{W_{\text{ген}} \cdot \rho} \quad (3)$$

мұндағы, $C_{\text{нег}}$ және $C_{\text{элек}}$ – сәйкесінше тенге/кВт-тағы негізгі жабдықтың және электр жабдықтарының шығындары;

k – басқа шығындарды есепке алу үшін қолданылатын көбейткіш коэффициент.

Негізгі бу шығынының меншікті таза жылдамдығы, кг/кВтсағ:

$$d_{\text{макс}} = \frac{3600 \cdot F_{\text{бу макс}}}{W_{\text{ген}}} \quad (4)$$

мұндағы, $F_{\text{бу макс}}$ – негізгі бу массасының шығыны, кг/с.

Меншікті таза энергия, кДж/кг:

$$e_{\text{макс}} = \frac{3600}{d_{\text{макс}}} \quad (5)$$

Бу электр станциясының әрбір құрамдас бөлігі (қазандық, турбина, конденсатор, сорғы, қыздырғыш және т.б.) үшін басқарушы теңдеулер жылу динамикасының негізгі заңдарына сүйенеді [8]. Бұл теңдеулер Моран мен Шапиро еңбектерінде егжей-тегжейлі берілген.

$$\sum_i \cdot m_i = \sum_e \cdot m_e \quad (6)$$

$$Q_{cv} + \sum_i \cdot m_i \cdot \left(h_i + \frac{v_i^2}{2} + z_i \cdot g \right) = W_{cv} + \sum_e \cdot m_e \cdot \left(h_e + \frac{v_e^2}{2} + z_e \cdot g \right) \quad (7)$$

$$\sum_j \cdot \left(1 - \frac{T_j}{T_i} \right) \cdot Q_{cv} + \sum_i \cdot m_i \cdot e_{f,i} = W_{cv} + \sum_e \cdot m_e \cdot e_{f,e} + E_d \quad (8)$$

мұндағы, e_f – ағынның ерекше эксергиясы, ол келесідей анықталады:

$$e_f = (h - h_0) + T \cdot (s - s_0) + \frac{v^2}{2} + gz \quad (9)$$

Циклдің барлық құрамдас бөліктерінде кинетикалық және потенциалдық энергия өзгерістерін елемеуге болады.

Нәтижелер және талқылау

Суперкритикалық, ультра суперкритикалық және жетілдірілген ультра суперкритикалық электр станцияларының жұмыс шарттары Үндістан үкіметінің электр энергетикасы жөніндегі орталық органы шығарған ұлттық электр жоспарынан алынған. Осы зерттеу үшін қарастырылатын жұмыс параметрлерінің ауқымы төмендегі кестеде келтірілген (2-кесте).

2-кесте – Цифрлы сенсорлар арқылы жиналған мәліметтер

Технология	Турбинаның кіріс қысымы	Турбинаның кіріс температурасы
Суперкритикалық (СК) электр станциясы	221 бардан 250 барға дейін	500 °C пен 600 °C
Ультра суперкритикалық (УСК) қуат	251 бардан 300 барға дейін	550 °C пен 700 °C
Жетілдірілген ультра суперкритикалық (ЖУСК) қуат	301 бардан 350 барға дейін	700 °C пен 800 °C

Суперкритикалық электр станциясының сценарийі үшін электр станциясының имитацияланған моделі 0,1-ден 0,5-ке дейінгі әртүрлі қысым коэффициенттерімен орындалды.

Суперкритикалық бу параметрлері бар электр станциясының жұмыс режимдерін зерттеу мақсатында, сандық имитациялық модель құрылды. Бұл модель негізінде электр станциясының негізгі термодинамикалық элементтері (қазандық, турбина, конденсатор және т.б.) үшін энергия және масса баланстары құрылып, MATLAB/Simulink ортасында іске асырылды (2-сурет).

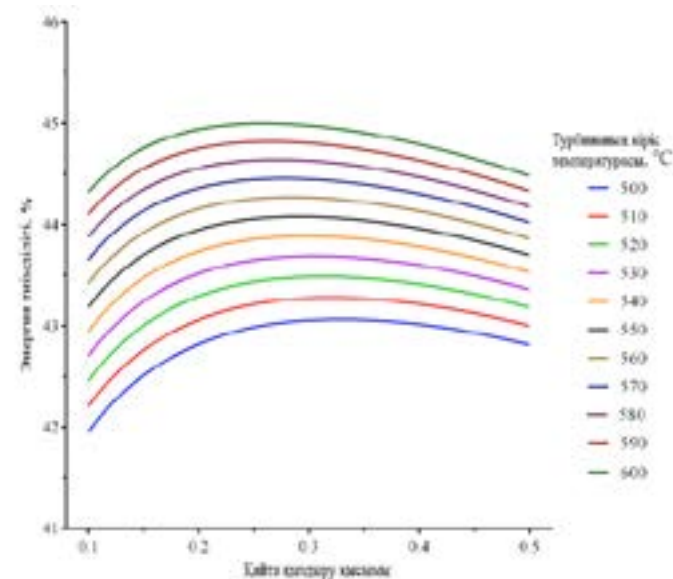
Зерттеу барысында қысым коэффициенті деп аталған параметрдің мәні 0,1–0,5 аралығында өзгертіліп, әртүрлі сценарийлер модельденді. Бұл параметр турбина кірісі мен шығысы арасындағы қысым айырмасын немесе басқару жүйелеріндегі релятивті қысым айырмасын білдіруі мүмкін.

Модельдеу нәтижелері келесіні көрсетті:

– Қысым коэффициентінің жоғарылауы турбинадағы кеңею жұмысына және жалпы пайдалы қуатқа оң әсер етеді;

– Алайда, бұл көрсеткіштің шекті мәндерінен асқанда эксергетикалық шығындар және қыздырғыштардағы жылу жүктемелері арта түседі;

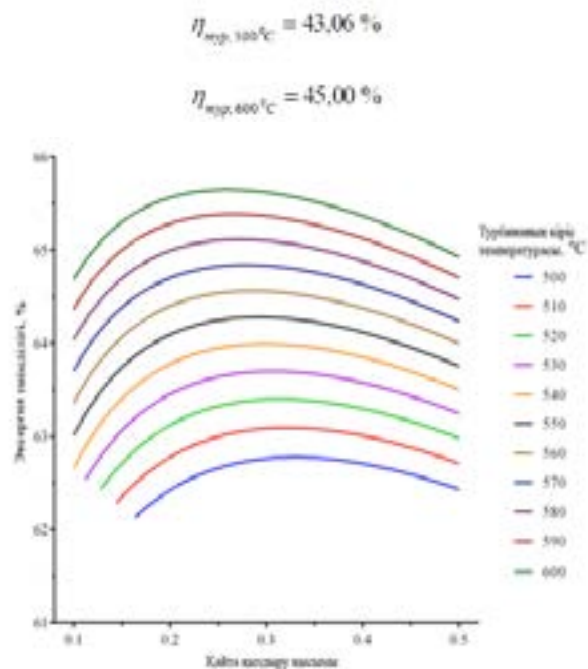
– Оптималды қысым коэффициенті 0,35–0,4 шамасында анықталды, бұл цикл тиімділігін максимумға жақындатады.



3-сурет – Қайта қыздыру қысымының қатынасының энергия тиімділігіне әсері – суперкритикалық жұмыс параметрлері үшін

Турбинаның кіріс температурасын 500 °C-ден 600 °C-қа өзгерткен кезде максималды тиімділік (оңтайлы қыздыру қысымының қатынасында байқалады) 43,06 % -дан 45 %-ға дейін өсті. Сондай-ақ, қайта қыздыру қысымының арақатынасының оңтайлы мәні турбинаның кіріс температурасының әртүрлі болуымен ерекшеленеді: турбинаның кіріс температурасы 500 °C үшін 0,328-ден 600 °C кезінде 0,26-ға дейін төмендеуі. Басқаша айтқанда, жылу тиімділігі барлық қайта қыздыру қысымының коэффициенттерінде температураның артуымен бірге өсу біршама біркелкі емес, бұл оңтайлы қыздыру қысымының (яғни, жылу тиімділігі максималды болатын қысым) турбинаның кіріс температурасының жоғарылауымен төмендеуіне әкеледі.

Турбина кіріс температурасының артуы тиімділіктің елеулі жақсаруына әкеледі:



4-сурет – Қайта қыздыру қысымының қатынасының эксергия тиімділігіне әсері – суперкритикалық жұмыс параметрлері үшін

4-сурет бойынша станция жұмысының термодинамикалық тиімділігін арттыру мақсатында турбинаның кіріс температурасын 500 °C-тан 600 °C-қа дейін өзгерту арқылы модельдеу жүргізілді. Бұл зерттеу нәтижесінде жылу тиімділігі мен қайта қыздыру қысымының оптималды қатынасы арасындағы байланыс анықталды.

Температура жоғарылаған сайын бу энергиясының потенциалы артады. Бұл турбинада көбірек жұмыс өндіруге мүмкіндік береді, алайда бұл процесс бу жолының тиімді конфигурациясын өзгертуді талап етеді. Атап айтқанда, қайта қыздыру сатыларында қысым қатынасын төмендету арқылы жалпы эксергетикалық шығындарды азайтуға болады [9];[10].

Температура артқанда тиімділіктің өсуі қайта қыздыру қысымының барлық мәндерінде байқалады, бірақ бұл өсу біркелкі емес. Жоғары температурада жылу алмасу градиенттері, қайтымсыздықтар, және эксергия жоғалтулары өзгереді, бұл жалпы үрдістің оңтайлы қысым нүктесін төменге ығыстыруына себеп болады.

Суперкритикалық бу электр станциясының термодинамикалық циклін оңтайландыру барысында жүйенің тиімділігін арттыру, отын шығынын азайту, және эксергетикалық шығындарды төмендету мақсатында жұмыс параметрлерін жүйелі түрде таңдауды қарастырдық.

Қорытынды

Бұл зерттеу жұмысында бір рет қыздырылатын суперкритикалық бу электр станциясының термодинамикалық циклі жан-жақты зерттеліп, оның жылу-энергетикалық көрсеткіштерін оңтайландыру мақсатында түрлі параметрлерге әсері талданды. Атап айтқанда, турбина кірісіндегі бу температурасының (500–600 °C аралығында) және қайта қыздыру қысымының қатынасының (0,1–0,5 диапазонында) жылу тиімділігіне (η) әсері сандық модельдеу арқылы анықталды.

Жүргізілген имитациялық есептеулер нәтижесінде төмендегідей қорытындылар алынды:

Турбина кіріс температурасының жоғарылауы жылу тиімділікті арттыратыны дәлелденді: 500 °C кезінде тиімділік 43,06 % болса, 600 °C кезінде 45,00 %-ға жетті. Бұл – шамамен 1,94 пайыздық пунктке немесе 4,5 % салыстырмалы артықшылық.

Бу температурасы өскен сайын қайта қыздыру қысымының оптималды қатынасы төмендейді:

500 °C кезінде $R=0,328$

600 °C кезінде $R=0,260$.

Бұл үрдіс эксергетикалық шығындарды азайту үшін жоғары температурада бу қысымын төмен ұстау қажеттігін көрсетеді.

Жылу тиімділіктің өзгерісі температура мен қысым параметрлерінің күрделі өзара байланысына негізделген, бұл мультипараметрлік оңтайландыруды талап етеді.

Оптимизация нәтижелері Парето фронты түрінде ұсынылып, энергетикалық және эксергетикалық тиімділіктер арасындағы теңгерімді қамтамасыз ететін параметрлер анықталды.

Зерттеу нәтижелері болашақта суперкритикалық электр станцияларын жобалауда және қайта жаңғыртқанда жүйелік параметрлерді дұрыс таңдау, жылу үнемділігін арттыру, отын шығынын азайту, және экологиялық әсерді төмендету үшін қолдануға болады.

Оңтайландырылған термодинамикалық цикл – жоғары тиімділікке қол жеткізумен қатар, жабдықтардың ұзақ мерзімді жұмыс істеу сенімділігін де қамтамасыз етеді. Бұл энергия өндірісінің экономикалық және экологиялық тұрғыдан тиімділігін арттырады.

ПАЙДАЛАНЫЛҒАН ДЕРЕКТЕР ТІЗІМІ

- 1 **Онгар, Б., Ныгыманова, А. С.** Техникалық термодинамика (Оқулық). Қ. И. Сәтбаев атындағы Қазақ ұлттық техникалық зерттеу университеті басылымы Т. Кенеев атындағы «Polytech» баспа орталығы. – Алматы: ҚазҰТЗУ басылымы, – 2024. – 101 – б.
- 2 **Chen, X., Shi, Z., Zhang, Z., Zhu, M., Oko, E., Wu, X.** Dynamic modeling and comprehensive analysis of an ultra-supercritical coal-fired power plant integrated with post-combustion carbon capture system and molten salt heat storage. // *Energy*, – 2024. – №308. – P.132961.
- 3 **Suyog, S. S., Anand, K. K., Rajkumar, B. B., Kumar, R., Ongar, B., Sarsenbayev, Y., Kumar, S. P., Mohammad, S. S. Alsoofi, Elsheikh, A. A.** New Approach for Failure Modes, Effects, and Criticality Analysis Using ExJ-PSI Model – A Case Study on Boiler System. // *Applied Sciences (Switzerland)*. – 2022. – Vol. – 12 – Issue. – 22 – P. 11419.
- 4 **Лесин, В. В., Лисовец, Ю. П.** Основы методов оптимизации. – М. : Изд-во МАИ, – 2015. – С. 344 .
- 5 **Рассохин, В. А.** Турбины конструкции ЛПИ : преимущества, характеристики, опыт разработки и реализация / В. А.Рассохин // Научно-технические ведомости СПбГПУ. – 2016 – № 4 (135). – С. 41–51.
- 6 **Chi, S., Luan, T., Liang, Y., Hu, X., Gao, Y.** Analysis and Evaluation of Multi-Energy Cascade Utilization System for Ultra-Supercritical Units. *Energies*, – 2020. – № 13. – P. 3969.
- 7 **Белов, Г. В.** Органический цикл Ренкина и его применение в альтернативной энергетике // Наука и образование: науч. изд. МГТУ имени Н. Э. Баумана. – 2014. – № 2. – С. 99–124.
- 8 **Клименко, А. В.** [и др.]. Особенности комбинированного производства электроэнергии, тепла и холода на базе парогазовой установки // Теплоэнергетика. – 2015. – № 3. – С. 11–15. – <https://doi.org/10.1134/S0040363615030042>.
- 9 **Ovsyannik, A. V.** Thermodynamic Analysis and Optimization of Low-Boiling Fluid Parameters in a Turboexpander // *Journal of Physics : Conference Series*. – 2020. – Vol. 1683. – No 042005.
- 10 **Ovsyannik, A. V.** [et al.]. Trigenation Units on Carbon Dioxide with Two-Time Overheating with Installation of Turbo Detainderand Recovery Boiler // *Journal of Physics : Conference Series*. – 2020. – Vol. 1683. – № 042010

REFERENCES

- 1 **Ongar, B., Nygymanova, A. S.** Tehnikalyq termodinamika (Oqulyq). [Technique thermodynamics] // Q. İ. Sätbaev atyndağy Qazaq ũlttyq tehnikalyq zertteu universiteti basylymy T. Keneev atyndağy «Polytech» baspa ortalyğy. – Almaty : QazŪTZU basylymy, – 2024. – P. 101 .
- 2 **Chen, X., Shi, Z., Zhang, Z., Zhu, M., Oko, E., Wu, X.** Dynamic modeling and comprehensive analysis of an ultra-supercritical coal-fired power plant integrated with post-combustion carbon capture system and molten salt heat storage. // *Energy*. – 2024. – № 308. – P. 132961.
- 3 **Suyog, S. S., Anand, K. K., Rajkumar, B. B., Kumar, R., Ongar, B., Sarsenbayev, Y., Kumar, S. P., Mohammad, S. S. Alsoofi, Elsheikh, A. A.** New Approach for Failure Modes, Effects, and Criticality Analysis Using ExJ-PSI Model – A Case Study on Boiler System. // *Applied Sciences (Switzerland)*. – 2022. – Vol. 12. – Issue. – 22. – P. 11419.
- 4 **Lesin V. V., Lisoves İu. P.** Osnovy metodov optimizatsii. [Fundamentals of Optimization Methods] – M. : İzd-vo MAİ – 2015. – P. 344.
- 5 **Rassohin, V. A.** Turbiny konstruksii LPI : preimūshstva, harakteristiki, opyt razrabotki i realizatsia // [LPI turbines: advantages, characteristics, development experience and implementation] // V. A. Rassohin // Nauchno-tehnicheskie vedomosti SPbGPU, – 2016 – № 4 (135). – P. 41–51.
- 6 **Chi, S., Luan, T., Liang, Y., Hu, X., Gao, Y.** Analysis and Evaluation of Multi-Energy Cascade Utilization System for Ultra-Supercritical Units. *Energies* . – 2020, – №13, – P. 3969.
- 7 **Belov, G. V.** Organicheski sikl Renkina i ego primenenie v äльтернативной энергетике [Organic Rankine Cycle and its Application in Alternative Energy]. // Nauka i obrazovanie: nauch. izd. MGTU im. N. E. Baumana. – 2014. №2. P. 99–124.
- 8 **Klimenko A. V.** [i dr.]. Osobennosti kombinirovannogo proizvodstva elektroenergii, tepla i holoda na baze parogazovoi ustanovki /[Features of combined production of electricity, heat and cold based on a combined cycle gas turbine] // Teploenergetika. – 2015. – № 3. – P. 11–15. – <https://doi.org/10.1134/S0040363615030042>.
- 9 **Ovsyannik, A. V.** Thermodynamic Analysis and Optimization of Low-Boiling Fluid Parameters in a Turboexpander // *Journal of Physics: Conference Series*. – 2020. Vol. 1683. – No 042005.
- 10 **Ovsyannik A. V.** [et al.]. Trigenation Units on Carbon Dioxide with Two-Time Overheating with Installation of Turbo Detainderand Recovery Boiler // *Journal of Physics: Conference Series*. – 2020. – Vol. 1683. – № 042010.

15.09.25 ж. баспаға түсті.
11.11.25 ж. түзетулерімен түсті.
05.12.25 ж. басып шығаруға қабылданды.

A. T. Dosanova¹, M. S. Isataev², B. Ongar³, *Zh. S. Duisenbek⁴

^{1,2}Kazakh National University named after al-Farabi,

Republic of Kazakhstan, Almaty;

³Kazakh National Research Technical University named after K. I. Satbaev,
Republic of Kazakhstan, Almaty;

⁴Gumarbek Daukeev Energo University, Republic of Kazakhstan, Almaty.

Received 15.09.25.

Received in revised form 11.11.25.

Accepted for publication 05.12.25.

OPTIMIZATION OF THERMODYNAMIC CYCLES OF SUPERCRITICAL STEAM GENERATORS

This article discusses in detail the issues of optimizing the thermodynamic cycles of highly critical steam generators. In the modern energy industry, improving the efficiency of steam power plants operating in a high-pressure and temperature zone is the main focus of ensuring energy conservation and environmental sustainability. In the course of the study, the thermodynamic parameters of steam generation in super-critical and ultra-super-critical modes based on the Rankine cycle were analyzed and their energy and exergetic parameters were compared.

Regenerative heat exchange systems, intermediate boiling processes, and exergetic analysis methods were used for optimization purposes. These approaches make it possible to increase the efficiency of steam generators, reduce heating costs and ensure efficient fuel use. In addition, the research results are aimed at improving the quality of heat balance and ensuring stable operation of steam generation systems.

Theoretical calculations were compared with real production parameters and effective ways of designing and upgrading highly critical steam generators were demonstrated. The article makes an important scientific and engineering contribution to modern energy, offering practical recommendations for improving the efficiency of power plants.

The results of this study determine the future directions of development of high-critical steam generators and lay the scientific foundation for the design of energy systems with high energy efficiency and environmentally friendly energy.

Keywords: steam generator, thermodynamic cycle, energy efficiency, optimization, regeneration, intermediate boiling, steam turbine.

A. T. Dosanova¹, M. S. Isataev², B. Ongar³, *Zh. S. Duisenbek⁴

^{1,2}Казахский национальный университет имени аль-Фараби,

Республика Казахстан, г. Алматы;

³Казахский национальный исследовательский технический университет имени К. И. Сатпаева, Республика Казахстан, г. Алматы;

⁴Алматинский университет энергетики и связи имени Гумарбека Даукеева,
Республика Казахстан, г. Алматы.

Поступило в редакцию 15.09.25.

Поступило с исправлениями 11.11.25.

Принято в печать 05.12.25.

ОПТИМИЗАЦИЯ ТЕРМОДИНАМИЧЕСКИХ ЦИКЛОВ СВЕРХКРИТИЧЕСКИХ ПАРОГЕНЕРАТОРОВ

В данной статье подробно рассматриваются вопросы оптимизации термодинамических циклов высококритических парогенераторов. В современной энергетической отрасли повышение эффективности парогенераторов является основным направлением обеспечения энергосбережения и экологической устойчивости. В ходе исследования были проанализированы термодинамические параметры парогенерации в супер-критическом и ультра-супер-критическом режимах на основе цикла Ренкина и сопоставлены их энергетические и эксергетические показатели.

В целях оптимизации использовались регенеративные теплообменные системы, промежуточные процессы кипения и методы эксергетического анализа. Эти подходы позволяют повысить коэффициент полезного действия (КПД) парогенераторов, снизить затраты на отопление и обеспечить эффективное использование топлива. Кроме того, результаты исследования направлены на улучшение качества теплового баланса и обеспечение стабильной работы систем парогенерации. Теоретические расчеты сравнивались с реальными производственными параметрами и демонстрировались эффективные пути проектирования и модернизации высококритических парогенераторов. Статья вносит важный научный и инженерный вклад в современную энергетику.

предлагая практические рекомендации по повышению эффективности энергетических установок.

Результаты этого исследования определяют будущие направления развития высококритических парогенераторов и закладывают научную основу для проектирования энергосистем с высокой энергоэффективностью и экологически чистой энергией.

Ключевые слова: Парогенератор, термодинамический цикл, энергоэффективность, оптимизация, регенерация, промежуточное кипение, паровая турбина.

FTAMP 44.31.35

<https://doi.org/10.48081/HYME7086>

**А. М. Достияров¹, *А. Н. Сапарғалиева²,
М. Е. Туманов³, Г. С. Катранова⁴**

^{1,3}Ф. Дәукеев атындағы Алматы энергетика және байланыс университеті, Қазақстан Республикасы, Алматы қ.

²С. Сейфуллин атындағы Қазақ агротехникалық зерттеу университеті, Қазақстан Республикасы, Астана қ.

⁴British American Tobacco компаниясы, Қазақстан Республикасы, Алматы қ.

¹ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-6559-8598>

²ORCID: <https://orcid.org/0009-0009-4781-2528>

³ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-0093-719X>

⁴ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-0688-5324>

*e-mail: ms.lady.aigerima@bk.ru

ЖЫЛУ ГЕНЕРАТОРЫҢДАҒЫ МИКРОЖАЛЫҢДЫ АЛДЫҢҒЫ ҚҰРЫЛҒЫНЫҢ АУА САПТАМАЛАРЫ ҚАЛАҒЫНЫҢ АЙНАЛУЫНЫҢ ӘСЕРІ

Бұл мақала жылу генераторларында қолданылатын микро жалынның алдыңғы құрылғысындағы (МЖАҚ) жану сипаттамаларына ауа саптамасының қалақшаларының айналуының әсерін қарастырады. Зерттеудің мақсаты – ауа ағынының аэродинамикалық параметрлерін оңтайландыру арқылы жанудың тиімділігі мен тұрақтылығын арттыру. Әртүрлі бұралу бұрыштары және олардың жалынның пайда болуына әсері, жалынның тұрақтылығы, отынның жану толықтығы және қондырғының техникалық-экономикалық көрсеткіштері қарастырылады.

Жану аймағындағы аэродинамикалық және жылулық процестерді талдау күйінді ауа ағынының әртүрлі схемалары үшін жүргізілді. Оңтайлы бұралу бұрышы жалынның тұрақтандыруын жақсартуға, зиянды заттардың шығарындыларын азайтуға және жылу генераторының энергия тиімділігін арттыруға көмектесетіні анықталды. Алынған нәтижелерді жаңа энергия үнемдейтін жылу генераторларын жобалауда пайдалануға болады. Бұл мәліметтер

энергияны тұтыну және экологиялық қауіпсіздік тұрғысынан микро алаудың жануының жоғары тиімділігін көрсетеді. Анықталған тәуелділіктердің табиғатын бейнелейтін графиктер мен диаграммалар берілген. Бұл жұмыс өнеркәсіпте және ауыл шаруашылығындағы орташа және кіші кәсіпорындарда өнімдерді құрғату үшін қолданылатын жылу техникалық қондырғылардың энергия тиімділігі мен экологиялық қауіпсіздігін арттыру үшін өзекті болып табылады. Мақаланың қорытындылары ауа саптамасы жүйесінің элементтерін параметрлік оңтайландырудың практикалық маңыздылығын растайды.

Кілтті сөздер: алдыңғы құрылғы, жылу генераторы, ауа шүмегі, жану камерасы, NO_x шығарындылары.

Кіріспе

Жылу өндіретін жабдықтың тиімділігі мен экологиялық қауіпсіздігін арттыруға қойылатын заманауи талаптар жануды тұрақтандыру технологияларының дамуын ынталандырады [1; 2]. Осы саладағы перспективті шешімдердің бірі ықшамды өлшемдері бар отынның тұрақты және толық жануын қамтамасыз ететін микро алаудың алдыңғы құрылғыларын (МЖАҚ) пайдалану болып табылады.

Ауа саптамасының геометриясы мен конфигурациясы, атап айтқанда, қалақтардың бұралуы алау құрылымын қалыптастыруда және жалынды тұрақтандыруда ерекше рөл атқарады. Құйынның пайда болу қарқындылығы, турбуленттілік деңгейі, сондай-ақ температура мен жану өнімдерінің концентрациясының таралуы айналу бұрышы мен ауа ағынының бағытына байланысты. Бұл параметрлер отынның жануының толықтығына, алаудың тұрақтылығына және азот оксиді (NO_x) шығарындыларына тікелей әсер етеді [3; 4].

Бұл зерттеу МЖАҚ жану сипаттамаларына әртүрлі ауа саптамаларының бұралу бұрыштарының әсерін зерттеуге бағытталған. Жұмыстың мақсаты – жылу тиімділігін арттыру және зиянды шығарындыларды азайтуды ескере отырып, саптаманың дизайнын оңтайландыру. Зерттеу жалын тұрақтылығын, газ температурасын және NO_x түзілуін бағалауды қоса алғанда, жану аймағындағы аэродинамикалық және жылу процестерінің жан-жақты талдауын қамтыды.

Материалдар мен әдістері

Отынның микро алау жануына жақындау әдістерінің бірі – перфорацияланған алдыңғы конустың және жылу генераторындағы ауа саптамасының орналасуы (1-сурет). Ауа саптамаларында ауа ағынының кинетикалық энергиясы отын ағынын бөлшектеуге жұмсалады, сондықтан жоғары сапалы бүркуге қол жеткізу үшін ауаның көп мөлшері қажет.

Бұл ауа жанғыш қоспаны дайындау үшін пайдаланылғаннан кейін жылу генераторының бастапқы аймағында жану процесіне қатысады.

Әртүрлі алдыңғы перфорациясы бар жылу генераторының бөлігі ретінде қалақтарының әртүрлі бұралуы бар ауаны тұрақтандыратын саптама зерттелді. Саптамада бастапқы ауа кіріс регистрінің қалақшаларымен бұралып, артық қысымда отын түтігінен перпендикуляр ағып жатқан отын ағындарын алып, онымен араласады. Содан кейін тұрақтандыру конусының айналасында ағып, ауа саптамасының шығыс регистрінен өтетін жанғыш қоспасы камераның тесілген алдыңғы конусы бойымен отын-ауа қоспасын шашыратып, камераның жану аймағына бұралған ағын ретінде шығады. Бұл жағдайда дамыған жалын фронттың бойымен жүреді.



1-сурет – Жылу генераторының перфорацияланған алдыңғы конусы және ауа шүмегі

Жылу генераторының жалын түтігі тәжірибелік стендте 2-суретте зерттелді, ТС-І керосин мен газ тәрізді отынның жануы кезінде бірнеше кезеңдерде:

- ауа саптамасының кіріс және шығыс бұрандаларының қалақтарының бұрыштарының әсері;
- жану камерасының сипаттамаларына алдыңғы перфорацияның әсері;
- жылу генераторының жалын түтігінің алдыңғы құрылғысының конусын таңдау.



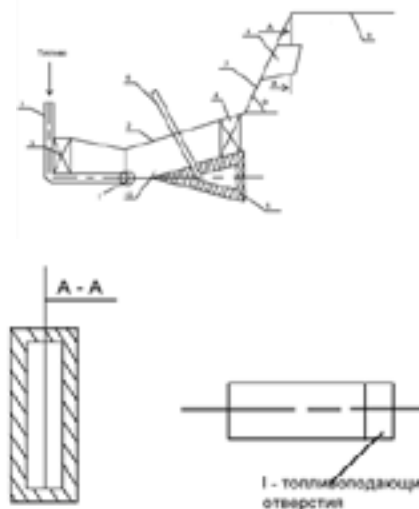
2-сурет – Алдыңғы құрылғылар мен оттықтарды зерттеуге арналған стендтің жалпы көрінісі

Нәтижелер және талқылау

Кіріс бұрандалы қалақтардың бұрышын таңдау отын-ауа қоспасының сапасына және оттықтағы, яғни ауа саптамасындағы гидравликалық шығындарға әсер етеді. Кедергі коэффициентінің қалақ бұрышына тәуелділігі [1]-де көрсетілген.

$\xi_{\text{дх}}$ кедергі коэффициентінің (β_1) орнату бұрышына тәуелділігі [5; 6] жұмыстарда келтірілген, олар $\beta > 40^\circ$ кезінде гидравликалық шығындардың күрт өсетінін, β_1 ал – дің 30° немесе одан аз төмендеуі саптама камерасында турбуленттілік генерациясын төмендететінін көрсетеді. Сұйық отынды жағу үшін ауа шүмегінің тұрақтандырғышын қолдануға болады, бірақ оны патентте [7] және 3-суретте көрсетілгендей жасау керек.

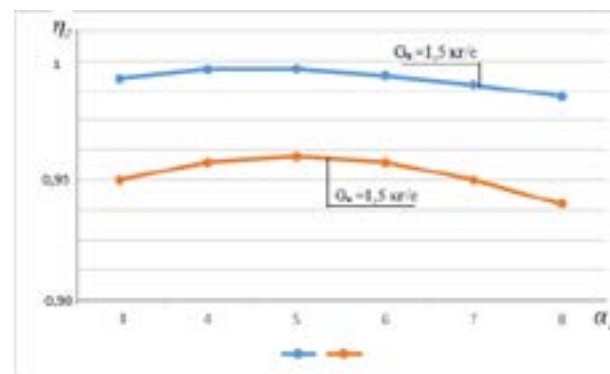
1-отын құбыры, 2 – Вентури құбыры, 3 - кіріс бұрандамасы, 4 – шығыс бұрандамасы, 5 – орталық конус, 6 – сутегі беру құбыры, 7 – алдыңғы қабырға, 8 – екінші ауаны беру үшін саңылаулы тармақтық құбыр, 9 – жалын құбыры, I – отын беру саңылаулары



3-сурет – Жылу генераторының алдыңғы құрылғысы

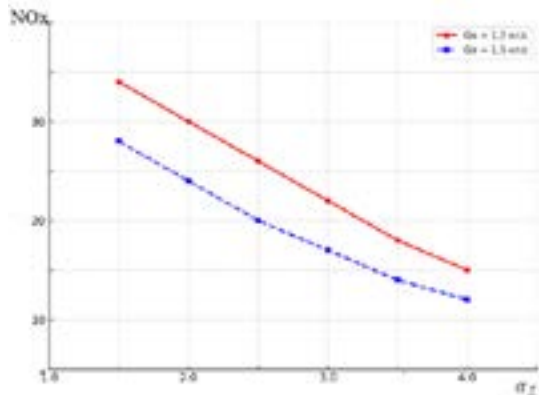
Алдыңғы конустың перфорациясы ауа тұрақтандырғыш саптамасы (АТ-С) пайдалану кезінде алдын ала дайындықпен және нашар қоспаның жануымен белгілі бір артықшылықтарға ие.

Араластыру сапасы $\eta_c = f(\alpha_2)$ и $C_{НОС} = f(\alpha_{НОС})$ тәуелділікке сәйкес эксперимент нәтижелері бойынша анықталды.



4-сурет – Ауа саптамасындағы жану тиімділігі коэффициентінің жалпы артық ауа коэффициентіне тәуелділігі

Құйынды оттық құрылғыларының құрылымдық элементтерінің айналмалы ауа ағыны отынның жану қарқындылығына және NO_x шығуына әсері тәжірибелермен бірнеше рет расталды [8]. Дәл осындай әсер «ауа» саптамалары бар эксперименттерде анық байқалды. Бұл жағдай МЖАҚ-да қалақтарды орнату бұрыштарының NO_x шығысына елеулі әсерін анықтауға мүмкіндік берді. Бұл болжамды тексеру үшін жұмыста орындалған «ауа» тұрақтандырғыш саптамасымен (АТС) жабдықталған жылу генераторының нұсқаларына арнайы зерттеулер жүргізілді.

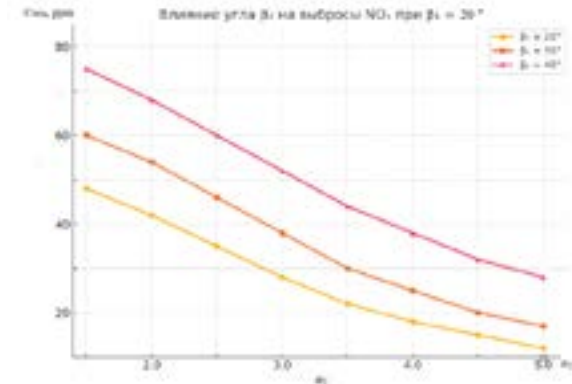


5-сурет – NO_x шығысының жану аймағындағы артық ауа коэффициентіне тәуелділігі

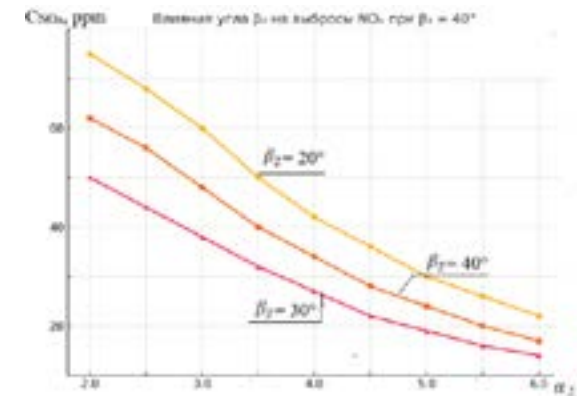
6 А, В-суретте АТС – β_2 шығыс регистрінің элементтерінің орнату бұрышының әсері жалын түтігінің алдыңғы бөлігінің әртүрлі ашылу бұрыштары бар жану камерасының екі нұсқасы үшін көрсетілген ($\theta = 70^\circ$ және 120°). $\beta_2 = 20^\circ$ бұрыштарда жүргізілген зерттеулерден; 30° ; 40° және 60° камераның $\theta = 70^\circ$ нұсқасы үшін ең аз NO_x шығысы $\beta_2 = 20^\circ$, ал $\theta = 120^\circ$ нұсқасы үшін $\beta_2 = 30^\circ$ кезінде байқалды. Алынған нәтижелерді жалын түтігінің алдыңғы бөлігіндегі ағын құрылымын талдау арқылы түсіндіруге болады, ол температура өрісінің таралуын анықтайды және жану өнімдерінің өрт аймағындағы тұру уақытының параметріне айтарлықтай әсер етеді, бұл жұмысты зерттеуде атап өтілген.

Осылайша, АТС-де ағынның бұралу бұрышын ұлғайту кері ток аймағының (КТА) өлшемін ұлғайтты, демек, жоғары температура аймағында «тұру уақытын» арттыратын айналымдағы газдардың үлесі жоғарылады. Сәйкесінше, $\beta_2 = 40^\circ$ -та NO_x эмиссиясы $\beta_2 = 30^\circ$ -қа қарағанда көбірек болды. Сондай-ақ, $\theta = 120^\circ$ болатын жалын түтігі нұсқасындағы В төмен мәндерінде

өтпелі конустың қабырғаларынан бөлінген ағын және мұнда айналатын газ мөлшері камераның ортасында, яғни КАА-ның өзінде айтарлықтай асып кеткенін атап өткен жөн, бұл сонымен бірге жалпы «тұру уақытын» арттырды және NO_x шығарылымының жоғарылауын анықтады.



6-сурет – А. Кіріс және шығыс бұрандамаларын орнату бұрыштарының және жалын түтігінің алдыңғы жағының ашылу бұрышының NO_x шығысына әсері



7-сурет – В. Кіріс және шығыс бұрандаларды орнату бұрыштарының және жалын түтігінің алдыңғы жағының ашылу бұрышының NO_x шығысына әсері

Жүргізілген зерттеулерден басқа, ағынның аэродинамикалық құрылымының жалынды тұрақтандыруға әсерін және отын-ауа қоспасын [9;10] алдын ала дайындау сапасын η , σ және C_{NO} бойынша одан әрі нақтылау мақсатында ауыстырылатын шығыс АТС регистрлері бар жылу генераторының жалын түтігінде тәжірибелер жүргізілді (кейде кіріс АТС $\beta_2 = 0^\circ$). Тұрақты орнату бұрышы β_2 сақиналы регистрлердегі бұрылыс параметрін есептеу үшін келесі формула пайдаланылды:

$$K_p = \frac{2}{3} \cdot \frac{1 - \left(\frac{d_{BT}}{d_p}\right)^2}{1 - (d_{BT}/d_p)} \cdot \tau \theta \beta_2 \quad (1)$$

$K_{p2} < 0,4$ кезінде – әлсіз бұралу, $0,4 < K_{p2} < 0,6$ – орташа бұралу, және $K_{p2} > 0,6$ күшті бұралу.

Есептеу әдісін құру үшін қалақ регистрі () арқылы қосылған жану өнімдерінің мөлшері мен ауа мөлшерінің арақатынасын анықтау қажет. Тәжірибелерде ол әртүрлі қашықтықтағы жылдамдық профилін біріктіру арқылы анықталды:

$$\frac{G_{зот}}{G_{рас}} = (0,32 + 1,35 K_p) \cdot \frac{X}{A_{1\phi}} \quad (2)$$

мұндағы X – ағын бойынша регистрден қашықтық;

D_{ϕ} – диаметрі формула бойынша анықталады $D_{\phi} = \sqrt{A_{рас}^2 - A_{от}^2}$

Зная $G_{зот}$ біле отырып, $\tau_{пр}$ – кері ағын аймағында ыстық газдардың тұру уақытын табуға болады:

$$\tau_{пр} = \frac{G_{зот}}{\rho_B \cdot V_{зот}} \quad (3)$$

$V_{зот}$ – кері ток аймағының көлемі.

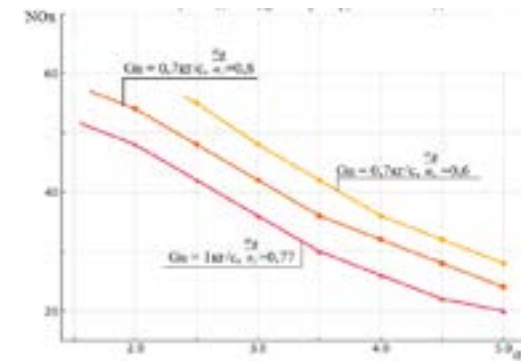
Жалынның бұзылуы кезінде ауа ағынының жылдамдығын табу үшін $\frac{\tau_{пр}}{\tau_c} \geq 1$ деп есептейміз. Мұнда тұрақтандырғыш ауа саптамалары үшін қолданылатын тәсіл нашар реттелген денелерге ұқсас, бұл жануды сенімді тұрақтандыру шарттарынан геометрияны есептеудің бірыңғай үлгісін әзірлеуді ыңғайлы етеді.

Бұрау дәрежесінің және қалақтардың түрінің әсерін анықтау үшін қысым жоғалтуларының көптеген өлшемдері жүргізілді, нәтижелер 6-суретте келтірілген. Профильді қалақтармен қысымның жоғалуы жазықпен салыстырғанда аз, ал айырмашылық β_2 бұрышының ұлғаюымен, яғни орнату бұрышының өсуімен артады.

Тәжірибелерде ең жоғары NO_x эмиссиясы $\beta_2 = 20^\circ$ кезінде байқалды, бұл рециркуляция аймақтарының ұлғайған өлшемдерімен түсіндірілді (оның ішінде өтпелі конустың шеткі бөлімдерінде). Жалпы алғанда, NO_x эмиссиясының нашарлауы АТС нұсқаларымен салыстырғанда $\beta_2 = idem$ деңгейінде нәтиже береді, мұнда алдын ала ағынның бұралуы кіріс бұрандаларында жүргізілді ($\beta_2 = 20^\circ$ және $40^\circ - 6$ А, В суретін қараңыз), бұл АТ алдын ала дайындайтын қоспаның сапасының айтарлықтай төмендеуіне байланысты болды. Соңғысы МЖАҚ құрылым элементтерінде мұндай «дайындық» қажеттілігін тағы да жанама түрде растады.

Сынақ стендісінде бұралмалы қалақтарды орнату бұрыштары $\beta_2 = 40^\circ$ және $\beta_2 = 30^\circ$ болатын ауаны тұрақтандыратын саптамасы бар жалын түтігі конусының әртүрлі нұсқалары бар жану камерасының үлгілері зерттелді.

Жалын түтігі цилиндр тәрізді, диаметрі 198 мм, саптаманы орнату диаметрі 55 мм, жалын түтігінің салыстырмалы ұзындығы $e' = \frac{l}{d} = 1,15$ Жалын түтігінің алдыңғы конусында үш белдікте 3,5 мм және \emptyset 5 мм тесіктер біркелкі жасалады: 1 – 30 тесік \emptyset 5 мм; 2 – 60 тесік \emptyset 5 мм; 3 – 60 тесік \emptyset 3,5 мм. Сынақ кезінде келесі параметрлер сақталды: ауа ағынының жылдамдығы $GB = 0,05 + 1,0$ кг/с, ауа температурасы 335–364°K, жану камерасының кірісіндегі қысым $p_B = 0,106 + 0,13$ МПа. Саптама арқылы ауаның салыстырмалы жылдамдығы $\frac{a_{\phi}}{a_c} = 0,35 + 0,8$ болды. Сынақтар белдік саңылауларының әртүрлі санымен жүргізілді және тәжірибе нәтижелері 7-суретте көрсетілген.



8-сурет – Алдыңғы жағынан өтетін ауа ағынының N_{Ox} шығуына әсері

Саптама арқылы салыстырмалы ауа ағынының жоғарылауымен азот оксидтерінің шығарылуы азаяды. $GB=0,7$ кг/с жану аймағындағы ауа

ағынының жылдамдығы кезінде $\frac{\sigma_{\phi}}{\sigma_2}$ арақатынасының 0,6-дан 0,8-ге дейін ұлғаюы N_{Ox} эмиссиясын 15 ÷ 20% төмендетеді (2 және 3 қисық).

Жану аймағы арқылы ауа ағынының ұлғаюы N_{Ox} түзілуін азайтады, бірақ сонымен бірге жылу генераторының тұрақты жұмысының шектері азаяды, ал жанудың толықтығы төмендейді.

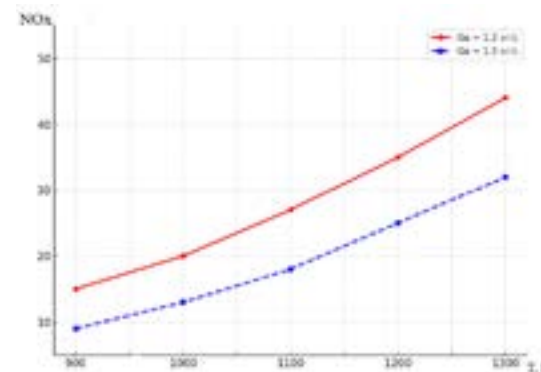
Осылайша, $G_{\phi} = G_2$ яғни $\frac{\sigma_{\phi}}{\sigma_2} = 1$, АТС бар жылу генераторының тұрақты жұмысы; $\alpha_{\Sigma} = 1 + 6$, кезінде ғана байқалады, ал $\eta = 0,92$ -ден аз болды.

$\frac{\sigma_{\phi}}{\sigma_2} = 0,8$ қатынасында отынның жану толықтығы $\eta_c = 0,98 \div 0,995$ болды және артық ауа коэффициенті үшін тұрақты жұмыс ауқымы кеңейді ($\alpha_{\Sigma} = 1 \div 24$). Жүргізілген зерттеулер тұрақты жұмыс шектерін кеңейту үшін саптама арқылы салыстырмалы ауа ағынын азайту қажет екенін көрсетті. 0,35 ÷ 0,45 дейін төмендеген кезде α_{Σ} үшін камераның жұмыс шегі 45 ÷ 60 құрайды.

Нәтижелерді талдау көрсеткендей, сұйық отынды жағу кезінде дұрыс перфорациялау жану процесінің тиімділігін арттырады, отынның жану толықтығын арттырады және азот оксидтерінің түзілуін азайтады, әсіресе камера жобалық режимде жұмыс істегенде. Жалын түтігінің алдыңғы бөлігінің конус бұрышы жану сапасына айтарлықтай әсер етеді.

Конустылықты АТС отын-ауа қоспасы жалын түтігінің алдыңғы бөлігі бойымен үздіксіз таралатындай етіп таңдау керек. Соңғы нұсқада бірінші белдеудегі алдыңғы конуста 1505 мм және үшінші белдеуде барлық 6003,5 мм саңылау қалдырылады. Сонымен қатар, жалын түтігінің конустық бөлігі диаметрі цилиндрлік бөлікке ауысқан кезде, жалын түтігін салқындату үшін жарықтар қалады. Бірақ газ тәріздес отынды жағу кезінде перфорацияға арналған микрожалынды жақсарту үшін біз алдыңғы жағындағы әртүрлі мөлшердегі радиалды жарықтарды зерттедік. Нәтижелерді басқа мақалада ұсынатын боламыз, өйткені N_{Ox} шығару 20 ppm дейін төмендеді.

Соңында, жанудың жоғары толықтығын қамтамасыз ету және азот оксидінің шығарындыларын азайту тұрғысынан шығыс бұрандаларының тегіс қалақтарын орнатудың ұтымды бұрыштары $\beta_2 = 30^\circ$ болып таңдалды. Эксперименттік зерттеулерді одан әрі дамыту жылу генераторының ауа шүмегінің тұрақтандырғышы арқылы жалын түтіктерінен азот оксидінің шығарындыларын азайту мүмкіндіктерін зерттеу болып табылады. Сынақтар ауаның температурасы 342 ÷ 360 К камераның кірісінде, ауа қысымы 0,108 ÷ 0,13 МПа, ауа ағынының жылдамдығы $G_B = 1,2 \div 1,5$ кг/с болды. Керосин отын ретінде пайдаланылды. Тәжірибелердің нәтижелері 8-суретте көрсетілген.



8-сурет – «Ауа» тұрақтандырғыш саптамасы бар жалын түтігінен камераның шығатын жеріндегі газ температурасына байланысты NOx шығарылымы

873-тен 1373°K-ге дейінгі шығыстағы газ температурасының өзгеру диапазонында $G_B = 1,2$ кг/с ауа ағыны кезінде азот оксидтерінің эмиссиясы 45 ppm аспады, ал $G_B = 1,5$ кг/с ағыны кезінде ол 40 ppm аспады. Жалпы артық ауа коэффициентіне және жану аймағындағы C_{NO} шығымы 5-суретте көрсетілген.

4-суретте отынның толық жану нәтижелері көрсетілген. $G_B = 1,5$ кг/с шығынында $\eta_c = 0,965 \div 0,995$ диапазонында $\alpha_{\Sigma} = 2 \div 9$. Қысымның жалпы жоғалуы $G_B = 1,5$ кг/с ауа шығыны кезінде 3%-дан аспады және $G_B = 1,2$ кг/с кезінде 2,5%-дан аз болды.

Көміртек тотығы шығарындылары $\alpha_{\Sigma} = 2 \div 5$ жалпы ауа коэффициентімен 0,01 ÷ 0,02 % құрады. Шығарылған газдарда көмірсутектер анықталған жоқ.

Қорытынды

1 Біздің тәжірибемізде ауа тұрақтандырғыш саптамасының $\beta_2 = 40^\circ$ және $\beta_2 = 30^\circ$ үшін ұтымды бұралу бұрыштары таңдалды және жылу генераторының алдыңғы құрылғысымен бірге стенде жан-жақты зерттелді.

2 Жылу генераторының алдыңғы құрылғысы үшін NOx эмиссиясы негізінде $\theta = 120^\circ$ бұрышы таңдалды.

3 Газды жағу үшін жылу генераторының алдыңғы құрылғысының перфорациясы саңылау түрінде жасалады.

4 Біздің тәжірибеміздің нәтижелері газ тәрізді отынды жағу кезінде NOx 20 ppm және одан төмен төмендеуіне қол жеткізуге болатынын көрсетті, бұл жылу генераторының шығарындыларына ең қатаң талапты қанағаттандырады.

5 АТС тәжірибелерінің нәтижелері жану аймағындағы артық ауа коэффициенті $\eta_c = 0,99$ қамтамасыз ету кезінде $\alpha_c \gg 1,5$ болуы мүмкін екенін көрсетті; тозаңдану және қоспаның түзілу сапасы саптама каналдарындағы ауа ағынының жылдамдығымен анықталады; улы компоненттердің шығымы әлдеқайда төмен, отынның жануы ерте аяқталады және біркелкі болады.

ПАЙДАЛАНЫЛҒАН ДЕРЕКТЕР ТІЗІМІ

1 Dostiyarov, A. M., Umyshev, D. R., Kibarin, A. A., Yamanbekova, A. K., Tumanov, M. E., Koldasova, G. A., Anuarbekov, M. A. Experimental investigation of non-premixed combustion process in swirl burner with LPG and hydrogen mixture. – <https://doi.org/10.3390/en17051012> (Date of access: 15.07.2025).

2 Qian, X., Meng, S., Kejian, Sh., Zhihui, L., Junxiao, F., Yaxuan X., Lin, L., Jiulong, W., Jingxiao, H., Zhiwe, T., Yanping, D. Influence of jet angle on diffusion combustion characteristics and NOx emissions in a self-reflux burner, Case Studies in Thermal Engineering, Vol. 25. – 2021. – 100953. – ISSN 2214-157X, – <https://doi.org/10.1016/j.csite.2021.100953> (Date of access: 16.07.2025).

3 Han, W., Lee, Y., Jang, J., Huh, K. Y. – <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2017.12.123> (Date conversion: 15.07.2025).

4 Chaoyang, Zh., Yongqiang, W., Qiye, J., Qijuan, Ch., Yuegui, Z. Mechanism analysis on the pulverized coal combustion flame stability and NOx emission in a swirl burner with deep air staging, Journal of the Energy Institute, Vol. 92. – Issue 2. – 2019. – P. 298–310. – ISSN 1743–9671. – <https://doi.org/10.1016/j.joei.2018.01.006> (Date of access: 15.07.2025).

5 Пчелкин, Ю. М. Камеры сгорания газотурбинных двигателей [Текст]. – М. : Машиностроение, 1984. – 280 с.

6 Лёфевр, А. Процессы в камерах сгорания ГТД [Текст]. – М. : Изд-во Мир, 1986. – 566 с.

7 Сапарғалиева, А. Н., Достиярова, А. М., Достияров, А. М. Патент на изобретение. № 36936. Фронтное устройство теплогенератора [Текст]. Оpubл.: 17.01.2025. Бюл. №3. – 3 с.

8 Dostiyarov, A. M., Umirzakov, D. R., Abdireva, A. M., Yamanbekova A. K. Heat generator impact on the grain drying mode and on the toxicity of combustion products. The Turkish Online Journal of Design, Art and Communication [Текст]. – TOJDAC. – September 2018 Special Edition. – P. 2366–2378.

9 Лавров, В. А. Процессы горения топлива и защита окружающей среды [Текст]. – М. : Машиностроение. – 1981. – 373 с.

10 Михеев, В. П., Медников, Ю. П. Сжигание природного газа [Текст]. – Л.: Недра. – 1975. – 391 с.

REFERENCES

1 Dostiyarov, A. M., Umyshev, D. R., Kibarin, A. A., Yamanbekova, A. K., Tumanov, M. E., Koldasova, G. A., Anuarbekov, M. A. Experimental investigation of non-premixed combustion process in swirl burner with LPG and hydrogen mixture. – <https://doi.org/10.3390/en17051012> (Date conversion: 15.07.2025).

2 Qian, X., Meng, S., Kejian, Sh., Zhihui, L., Junxiao, F., Yaxuan X., Lin, L., Jiulong, W., Jingxiao, H., Zhiwe, T., Yanping, D. Influence of jet angle on diffusion combustion characteristics and NOx emissions in a self-reflux burner, Case Studies in Thermal Engineering, Vol. 25. – 2021. – 100953. – ISSN 2214–157X, – <https://doi.org/10.1016/j.csite.2021.100953> (Date of access: 16.07.2025).

3 Han, W., Lee, Y., Jang, J., Huh, K.Y. – <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2017.12.123> (Date of access: 15.07.2025).

4 Chaoyang, Zh., Yongqiang, W., Qiye, J., Qijuan, Ch., Yuegui, Z. Mechanism analysis on the pulverized coal combustion flame stability and NOx emission in a swirl burner with deep air staging, Journal of the Energy Institute, Volume 92. – Issue 2. – 2019. – P. 298–310. – ISSN 1743–9671. – <https://doi.org/10.1016/j.joei.2018.01.006> (Date of access: 15.07.2025).

5 Pchelkin, Yu.M. Kamery sgoraniya gazoturbinnih dvigatelej [Combustion chambers of gas turbine engines] – М. : Mashinostroenie. – 1984. – 280 p.

6 Lefebvre, A. Processy v kamerah sgoraniya GTD [Processes in gas turbine engine combustion chambers] – М. : Mir, 1986. – 566 p.

7 Sapargaliev, A.N., Dostiyarova, A.M., Dostiyarov, A.M. Patent for invention. N36936. Frontovoe ustrojstvo teplogeneratora [Front heat generator device] Published: 01/17/2025. Bull. No. 3. – 3 p.

8 Dostiyarov, A. M., Umirzakov, D. R., Abdireva, A. M., Yamanbekova, A. K. Heat generator impact on the grain drying mode and on the toxicity of combustion products. The Turkish Online Journal of Design, Art and Communication [Text]. – TOJDAC. – September 2018 Special Edition. – P. 2366–2378.

9 Lavrov, V.A. Processy gorenija topliva i zashchita okruzhayushchej sredy [Fuel combustion processes and environmental protection] – М. : Mashinostroenie, 1981. – 373 p.

10 Miheev V. P., Mednikov Yu. P. Szhiganie prirodnogo gaza [Combustion of natural gas] – Л.: Nedra, – 1975. – 391 p.

15.07.25 ж. баспаға түсті.

24.07.25 ж. түзетулерімен түсті.

05.12.25 ж. басып шығаруға қабылданды.

А. М. Достияров¹, *А. Н. Сапарғалиева²,

М. Е. Туманов³, Г. С. Катранова⁴

^{1,3}Алматынський университет энергетикасы және байланысының атына Г. Даукеева,

Қазақстан Республикасы, Алматы;

²Қазақстан Республикасының аграрлық-техникалық ғылымдар университетінің атына С. Сейфуллина, Қазақстан Республикасы, Астана;

⁴British American Tobacco, Қазақстан Республикасы, Алматы.

Қабылданды 15.07.25.

Қабылданды түзетулермен 24.07.25.

Қабылданды баспаға 05.12.25.

ВЛИЯНИЕ ЗАКРУТКИ ЛОПАТОК ВОЗДУШНОЙ ФОРСУНКИ МИКРОФАКЕЛЬНОГО ФРОНТОВОГО УСТРОЙСТВА В ТЕПЛОГЕНЕРАТОРЕ

В данной статье исследуется влияние закрутки лопаток воздушной форсунки на характеристики горения в микрофакельном фронтальном устройстве (МФФУ), применяемом в теплогенераторах. Целью исследования является повышение эффективности и устойчивости горения за счёт оптимизации аэродинамических параметров воздушного потока. Рассматриваются различные углы закрутки и их воздействие на формирование факела, устойчивость пламени, полноту сгорания топлива и технико-экономические показатели установки.

Проведён анализ аэродинамических и тепловых процессов в зоне горения при различных схемах вихревого течения воздуха. Установлено, что оптимальный угол закрутки способствует улучшению стабилизации пламени, снижению выбросов вредных веществ и повышению энергоэффективности теплогенератора.

Полученные результаты могут быть использованы при проектировании энергосберегающих теплогенераторов нового поколения. Эти данные свидетельствуют о высокой эффективности микрофакельного горения с точки зрения как энергопотребления, так и экологической безопасности. Представлены графики и схемы, иллюстрирующие характер выявленных зависимостей. Данная работа актуальна для повышения энергоэффективности и экологической безопасности тепловых установок, используемых для сушки продукции в промышленности и малых и средних предприятиях сельского хозяйства. Выводы статьи подтверждают практическую значимость параметрической оптимизации элементов форсуночных систем.

Ключевые слова: фронтальное устройство, теплогенератор, воздушная форсунка, камера сгорания, NOx.

А. М. Достияров¹, *А. Н. Сапарғалиева²,

М. Е. Туманов³, Г. С. Катранова⁴

^{1,3}Gumarbek Daukeev Energo University,

Republic of Kazakhstan, Almaty;

²S. Seifullin Kazakh Agrotechnical Research University,

Republic of Kazakhstan, Astana;

⁴British American Tobacco, Republic of Kazakhstan, Almaty.

Received 15.07.25.

Received in revised form 24.07.25.

Accepted for publication 05.12.25.

EFFECT OF AIR NOZZLE BLADE SWIRL ON COMBUSTION CHARACTERISTICS IN A MICROTORCH FRONT DEVICE

This article examines the effect of air nozzle blade swirl on combustion characteristics in a microtorch front device (MTFD) used in heat generators. The aim of the study is to improve combustion efficiency and stability by optimizing the aerodynamic parameters of the air flow. Various swirl angles and their impact on flame formation, flame stability, fuel combustion completeness, and technical and economic performance of the unit are considered.

An analysis of aerodynamic and thermal processes in the combustion zone was carried out for various vortex air flow patterns. It was found that the optimal swirl angle improves flame stabilization, reduces emissions of harmful substances, and increases the energy efficiency of the heat generator.

The results obtained can be used in the design of new-generation energy-saving heat generators. These data indicate high efficiency of microtorch combustion in terms of both energy consumption and environmental safety. Graphs and diagrams illustrating the nature of the identified dependencies are presented. This work is relevant for improving the energy efficiency and environmental safety of thermal installations used for drying products in industry and small and medium-sized agricultural enterprises. The conclusions of the article confirm the practical significance of parametric optimization of nozzle system elements.

Keywords: front device, heat generator, air nozzle, combustion chamber, NOx.

<https://doi.org/10.48081/GFUN2079>

**Д. Д. Есимова¹, *А. В. Белый², А. А. Фаурат³,
А. Қ. Есім⁴, М. Р. Джанаргалиева⁵**

^{1,2,3,4,5}Торайғыров университет, Республика Казахстан, г. Павлодар.

¹ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-3824-875X>

²ORCID: <https://orcid.org/0009-0005-6044-6615>

³ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-9878-8224>

⁴ORCID: <https://orcid.org/0009-0006-0192-2244>

⁵ORCID: <https://orcid.org/0009-0005-4155-1110>

*e-mail: alexander.belyi@mail.ru

ОЦЕНКА И РЕКОМЕНДАЦИИ ПО СНИЖЕНИЮ ЭНЕРГЕТИЧЕСКИ ОБУСЛОВЛЕННЫХ ВЫБРОСОВ CO₂ В РЕГИОНАЛЬНОМ ТУРИЗМЕ

В данной статье рассматриваются ключевые источники энергетически обусловленных выбросов парниковых газов в туристической отрасли Павлодарской области. Основное внимание уделено анализу углеродного следа туристического сектора, проведённому с применением методологии GHG Protocol. Особое внимание сосредоточено на выбросах в рамках Score 1 (прямые выбросы от сжигания топлива) и Score 2 (косвенные выбросы от потребления электроэнергии и тепла). В ходе исследования представлены количественные оценки выбросов, а также выявлены наибольшие источники воздействия. Кроме того, в статье предложены практические меры по повышению энергоэффективности объектов туризма, включая внедрение низкоуглеродных и энергоэффективных технологий, расширение использования возобновляемых источников энергии (ВИЭ), а также реализацию проектов климатической компенсации. На основе анализа сделаны выводы о значительном потенциале снижения выбросов в энергетическом сегменте туризма региона при условии системного подхода и поддержки устойчивых инициатив со стороны бизнеса и государства.

Ключевые слова: углеродный след, туризм, энергоэффективность, выбросы CO₂, Score 1–2, декарбонизация, Павлодарская область.

Введение

Современный этап глобального климатического кризиса характеризуется резким ростом антропогенных выбросов парниковых газов (ПГ), основным источником которых остаётся энергетика. Однако в последние годы всё более отчётливо проявляется значительный вклад коммерческих и потребительских секторов – в том числе туризма. По оценкам Всемирной туристской организации (UNWTO) и Всемирного совета по путешествиям и туризму (WTTC), туризм отвечает примерно за 6,5–8 % глобальных выбросов ПГ, включая как транспорт, так и энергопотребление объектов размещения [10]. Согласно Nature Communications, с 2009 по 2019 год углеродный след туризма увеличился с 3,7 до 5,2 Гт CO₂экв., что вдвое превышает темп глобального экономического роста [4].

В структуре выбросов туризма основную долю (около 72 %) занимают транспортные эмиссии, около 24 % приходится на размещение. При этом расходы электроэнергии и тепла (Score 1 и 2) играют значимую роль в углеродном следе объектов размещения [3;4].

В условиях Казахстана влияние этой проблематики приобретает особое значение. По данным МЭА, в структуре экономики страны углеродоёмкость ВВП почти на 70 % превышает мировые показатели, а энергетика формирует до 80 % всех выбросов ПГ [2, с. 5]. Поэтому энергетически обусловленные компоненты углеродного следа туризма – приоритеты национальной климатической стратегии, уже отражённые в NDC и обязательствах по Парижскому соглашению.

Павлодарская область – один из перспективных туристических регионов северо-востока Казахстана. В его состав входит Баянаульский национальный парк – объект экологического и рекреационного значения. Как показало недавнее исследование Yessimova et al. (2025), проведённое в Баянаульском парке, углеродный след туристической деятельности составил 530 т CO₂экв. в год, из которых 20,5 % обусловлены отоплением – в основном углем, а 57 % – косвенные выбросы, связанные с логистикой и закупками [1].

Пилотный анализ туристических объектов в регионе выявил, что лишь два объекта могут формировать углеродный след порядка 714 т CO₂экв./год, причем значительная часть выбросов связана с энергетическим потреблением – отоплением и электропитанием (Score 1 и 2) [1]. Расчёты, проведённые по основным туристическим дестинациям (Баянаул, Павлодар и Павлодарский район, Щербактинский район) показывают, что вклад сектора туризма Павлодарской области составляет порядка 20 000 т CO₂экв. в год, что подтверждается также экстраполяционными оценками на основании подобных кейсов. Все это подтверждает значительность проблемы даже на региональном уровне, особенно учитывая наметившийся в последние годы

рост сектора туризма в области, а также использование в качестве основного топлива угля в качестве источника энергоснабжения.

Несмотря на значимость воздействия, до настоящего момента системных оценок и методик декарбонизации туризма в Казахстане нет. Между тем международные инициативы – Science Based Targets initiative (SBTi) и Глазговская декларация – призывают отрасль туризма интегрировать целевые показатели сокращения Scope 1–3 выбросов к 2030–2050 гг. Казахстан, как подписант Парижского соглашения, включил декарбонизацию туризма в свою климатическую стратегию, что отражено в национальных NDC (Bakdolotov A., 2025)

Цель настоящей работы – комплексная оценка углеродного следа сектора туризма Павлодарской области, с фокусом на Scope 1 и Scope 2 – выбросы, обусловленные потреблением энергии туристическими объектами, а также разработка практических рекомендаций по их снижению, включая:

- определение структуры и объёма энергетически обусловленных выбросов;
- выявление ключевых «горячих точек» (hot spots);
- разработку целей сокращения выбросов в соответствии с методологией SBTi;
- предложение технических и организационных мер, направленных на декарбонизацию;
- оценку потенциала климатических офсетных проектов;
- формулировку рекомендаций для региональной политики и субъектов туристической отрасли.

Статья вносит вклад в формирование регионального подхода к декарбонизации туризма, адаптируя международные методологии к реалиям энергетического профиля северного Казахстана.

Материалы и методы

С целью уточнения методологических основ настоящего исследования и оценки степени проработанности проблематики, ниже приведён краткий анализ научных публикаций, посвящённых расчёту углеродного следа в туризме, а также мерам по его сокращению с акцентом на энергетическую составляющую.

Как отмечено в работе Lenzen et al. (2018), углеродный след глобального туризма в период с 2009 по 2013 годы вырос с 3,9 до 4,5 Гт CO₂-экв. и достиг около 8 % мировых выбросов, включая прямые и косвенные эмиссии от транспорта, размещения и инфраструктуры [3]. При этом почти 20 % всех выбросов туризма связано с энергопотреблением объектов размещения, что подчёркивает значимость данного источника в структуре воздействия отрасли на климат.

Эти выводы были подтверждены и уточнены в более позднем исследовании Lenzen et al. (2024), опубликованном в Nature Communications [4]. Авторы показали, что к 2019 году глобальный углеродный след туризма достиг 5,2 Гт CO₂-экв., с темпом роста около 3,5 % в год, что в два раза выше среднегодового темпа роста глобальной экономики. При этом энергетическая эффективность отрасли улучшалась крайне медленно – менее чем на 0,3 % в год [Lenzen et al., 2024].

Анализ подходов к климатической политике в туризме представлен в работе Gössling, Scott & Hall (2022) [5]. В ней рассматриваются потенциальные сценарии декарбонизации отрасли и делается вывод о том, что без принятия срочных мер, выбросы туризма к 2050 году могут занять до 40 % допустимого глобального углеродного бюджета, если планируется удержать потепление в пределах 1,5 °C. Основными источниками эмиссий названы авиация и энергопотребление зданий [Gössling et al., 2022].

С практической точки зрения особый интерес представляют исследования, посвящённые энергоменеджменту в гостиничном секторе. Так, в статье Alhawamdeh et al. (2023) предложена модель устойчивого управления энергией в туристических объектах, включающая применение теплоизоляционных материалов, переход на возобновляемые источники энергии (ВИЭ), внедрение интеллектуальных систем учета и управления. Приводятся оценки сокращения углеродного следа при различных вариантах технической модернизации [6].

Подробный критический анализ источников углеродного следа от туризма представлен в статье Kanwal et al. (2024). Авторы классифицируют вклад транспорта, размещения и инфраструктуры, и подчёркивают важность включения в расчёты как прямых, так и косвенных энергетических выбросов (Scope 1 и 2). Кроме того, в работе сделан акцент на политике энергоэффективности в гостиницах и возможностях компенсации выбросов за счёт климатических офсетных проектов [7].

Наконец, в условиях Казахстана примечателен кейс, представленный Yessimova et al. (2025), где произведена оценка углеродного следа туристической деятельности в полупустынной зоне национального парка «Баянаул». В работе показано, что годовой углеродный след составил 530 т CO₂-экв., при этом 20,5 % выбросов приходилось на отопление с использованием угля, а 57 % – на косвенные эмиссии, связанные с транспортом и закупками. Авторы подчёркивают необходимость повышения энергоэффективности зданий, как основной резерв сокращения выбросов в условиях региона [1].

Таким образом, обзор литературы демонстрирует как зрелость международных подходов к расчёту и снижению углеродного следа в туризме,

так и актуальность их адаптации к специфике казахстанских регионов с высокой долей углеродоемкой энергии и энергоёмкой инфраструктурой.

Для оценки углеродного следа туристического сектора Павлодарской области в данной работе применялась методология GHG Protocol – международный стандарт учёта и отчетности по парниковым газам, разработанный World Resources Institute (WRI) и World Business Council for Sustainable Development (WBCSD) [8].

В соответствии с GHG Protocol, выбросы классифицируются по следующим охватам (Scopes):

– Score 1 – прямые выбросы от сжигания топлива на месте (в том числе для отопления, горячего водоснабжения и других нужд туристических объектов);

– Score 2 – косвенные выбросы, связанные с потреблением электроэнергии и тепла, получаемых от внешних поставщиков;

– Score 3 – прочие косвенные выбросы, включая логистику, поставки, отходы и перемещение туристов.

В настоящем исследовании основной акцент сделан на Score 1 и Score 2, как на составляющие, наиболее напрямую связанные с энергетическим профилем объектов туризма и подлежащие технической модернизации и декарбонизации. Score 3 рассматривается в качестве вспомогательной информации и оценки контекста.

Выбор секторального уровня анализа обусловлен необходимостью получения оценки углеродного следа всего туристического сектора региона, а не отдельных предприятий, что позволяет:

– выявить общие закономерности в структуре энергопотребления и выбросов;

– сформировать обобщённые и применимые на уровне региона меры по снижению выбросов;

– адаптировать международные подходы к национальной специфике, включая климат, структуру энергобаланса и доступность энергоносителей.

Для проведения количественных расчётов были использованы следующие группы данных:

– первичные сведения, полученные в ходе полевых обследований туристических объектов (включая гостевые дома, базы отдыха, санатории и пр.), охватывающие параметры годового потребления топлива, электроэнергии, режимы работы оборудования, число гостей, сезонность и продолжительность пребывания;

– официально предоставленные данные по энергопотреблению, типам котельного оборудования, видам топлива и численности туристов, полученные от администраций и управляющих компаний основных

туристических дестинаций Павлодарской области (включая Баянаульский национальный парк и прилегающие зоны);

– национальные коэффициенты эмиссий, утверждённые уполномоченными органами Республики Казахстан, использовались при расчётах выбросов от сжигания различных видов топлива (уголь, дизельное топливо, сжиженный газ и пр.); в случаях отсутствия национальных данных – применялась методология МЭИК (IPCC), изложенная в документе (2006 IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories)

Таким образом, расчёты соответствуют как международной методологии, так и национальной практике учета ПГ в энергетике. Для верификации и уточнения данных, а также расширения охвата оценки, была использована модель секторальной экстраполяции, основанная на типологии объектов, средней энергонагрузке и коэффициентах загрузки по сезонам. Данная модель базируется на ранее проведённых исследованиях (см. Yessimova et al., 2025) и адаптирована под региональные условия.

При расчёте косвенных выбросов по Score 2 использовались коэффициенты эмиссии для электроэнергии, характерные для Павлодарской области, где основным источником генерации остаются угольные ТЭЦ с удельным выбросом до 1,15 т CO₂/МВт·ч.

Расчёт углеродного следа туристического сектора Павлодарской области за базовый год (2022) позволил установить, что суммарные выбросы составили около 20 000 тонн CO₂-экв., с учётом охватов Score 1 и Score 2, а также части Score 3, отражающих ключевые процессы жизненного цикла туристических услуг.

Анализ распределения выбросов по категориям охвата показал следующую структуру:

– Score 1 (прямые энергетические выбросы) – около 2 812 т CO₂-экв. (≈14 %), обусловленные сжиганием топлива (в основном угля и дизельного топлива) на локальных котельных и печах;

– Score 2 (косвенные выбросы от потребления электроэнергии и тепла) – 3 038 т CO₂-экв. (≈15 %), связанных с высоким удельным коэффициентом эмиссий региональной угольной генерации;

– Score 3 (прочие косвенные выбросы: поставки, транспорт, отходы и пр.) – оставшиеся ≈14 150 т CO₂-экв., с преобладанием транспортной составляющей.

Таким образом, около 30 % общего углеродного следа сектора напрямую связано с энергетическим потреблением, что подчёркивает значимость мер по повышению энергоэффективности, переходу на ВИЭ и модернизации инженерных систем.

Рассматриваемый регион имеет ряд структурных и климатических особенностей, усиливающих углеродную нагрузку от туризма:

– Сезонность туризма в Павлодарской области выражена резкими пиками посещаемости летом (июнь–август), что ведёт к кратковременному, но высокому энергопотреблению на охлаждение, водоснабжение, транспорт и обслуживание объектов;

– Удалённость ключевых туристических дестинаций (в первую очередь, Баянаул) от централизованных сетей приводит к высокой доле автономных и неэффективных источников теплоснабжения (твердотопливные котлы, дизельные генераторы);

– Большая часть зданий, используемых в туристических целях, относится к советскому периоду постройки, с низкой теплоизоляцией, отсутствием систем регулирования теплоснабжения и использованием устаревших инженерных решений.

На рисунке 1 представлена детализированная структура углеродного следа по Баянаульскому району – главной туристической зоне области. График демонстрирует, что вклад Score 1 и 2 составляет в сумме 34 %, остальное – транспорт, отходы, закупки и пр. При этом усреднённое значение выбросов на одного туриста за ночь составляет около 54,6 кг CO₂-экв., что соответствует значениям, характерным для менее энергоэффективных регионов развивающихся стран.



Рисунок-1 – Структура углеродного следа туристической дестинации Баянаул (Павлодарская область) по категориям охвата (Scores)

На диаграмме представлены относительные доли различных категорий выбросов: прямые выбросы (Score 1), косвенные выбросы от потребления электроэнергии (Score 2), а также прочие косвенные выбросы (Score 3), включая транспорт, отходы, закупки и инфраструктурные услуги. Данные основаны на обобщении обследований объектов размещения, информации от местных администраций и модельной экстраполяции на уровень всей дестинации.

Для сопоставления: по данным [Lenzen et al., 2018], объекты туризма малой и средней вместимости в странах ЕС обычно производят от 100 до 500 т CO₂-экв. в год, а в Индии и Юго-Восточной Азии – до 700–800 т CO₂-экв. Основные отличия заключаются в широком применении ВИЭ, систем управления энергопотреблением и «зелёных закупок» в странах ЕС, чего пока не наблюдается в полной мере в Павлодарской области [3].

Таким образом, результаты анализа подтверждают необходимость принятия системных мер по декарбонизации туристического сектора региона, особенно в его энергетической части, что будет подробно раскрыто в следующих разделах статьи.

Высокая энергоёмкость туристической инфраструктуры в Казахстане обусловлена рядом технических, управленческих и экономических причин. Ключевые из них включают:

1 Изношенность зданий. Большинство туристических объектов, особенно в природных дестинациях, размещены в зданиях устаревших серий. Они имеют физический износ и не соответствуют современным требованиям теплозащиты, что ведёт к значительным потерям тепла и увеличенному потреблению энергии на отопление. По данным [Белый А. В., Сергазинова М. К. 2021], значительная доля объектов размещения в туристическом секторе Казахстана эксплуатируется без модернизации с советского периода [9, с.193].

2 Отсутствие теплоизоляции. Стены, крыши и оконные конструкции зачастую не утеплены или утеплены неэффективно. Это приводит к тепловым потерям до 30–40 % в холодный сезон, особенно в северных регионах страны. Такие потери значительно увеличивают эксплуатационные расходы и негативно влияют на устойчивость бизнеса в сфере туризма.

3 Устаревшие отопительные установки. Во многих объектах до сих пор используются автономные котлы с низким коэффициентом полезного действия (КПД), без погодной автоматики и регулировки. Это приводит к перетолам, избыточным выбросам и повышенному расходу топлива. Такие установки нередко являются также источниками локального загрязнения воздуха.

4 Низкая энергоэффективность освещения и бытовой техники. Широко применяется устаревшее оборудование: лампы накаливания, люминесцентные лампы без ЭПРА, бытовая техника классов C и D.

Согласно оценке Всемирной туристской организации (UNWTO), переход на энергоэффективное оборудование способен снизить потребление энергии на 30–50 % [10].

Недостаток систем энергоучета и регулирования. Во многих случаях отсутствуют приборы учета тепловой энергии, погодозависимая автоматика, системы диспетчеризации и визуального мониторинга. Это не позволяет контролировать потребление и оперативно оптимизировать энергозатраты.

При этом барьерами для модернизации служат:

1 **Сезонность:** большинство объектов туризма в Павлодарской области функционируют лишь в течение 3–4 месяцев в году. Это снижает инвестиционную привлекательность даже рентабельных энергоэффективных решений.

2 **Длинный срок окупаемости:** из-за низкой стоимости угольной энергии срок окупаемости энергоэффективных мероприятий составляет от 7 до 12 лет. Это создаёт барьеры для малого и среднего бизнеса [11, с.129].

На основе анализа структуры углеродного следа туристического сектора Павлодарской области и особенностей энергообеспечения объектов, предлагается комплекс приоритетных мероприятий, направленных на снижение выбросов, связанных с энергетическим потреблением (Score 1 и Score 2).

Меры сгруппированы по техническим и организационным направлениям и представлены в таблице 1.

Таблица 1 – Рекомендуемые меры по снижению углеродного следа по Score 1 и Score 2

Категория	Мера	Описание и ожидаемый эффект
Score 1	Переход с угольных и дизельных котлов на газовые установки	Снижение прямых выбросов CO ₂ до 40–50 % при сохранении тепловой мощности
	Внедрение тепловых насосов	Использование ВИЭ-источников для отопления в межсезонье и летний период
	Утепление зданий и ограждающих конструкций	Снижение теплопотерь на 30–40 %, уменьшение потребления топлива
	Установка погодозависимой автоматики	Оптимизация режимов работы котлов, снижение перетоков
Score 2	Замена ламп накаливания на LED	Снижение потребления электроэнергии на освещение до 70 %
	Использование энергоэффективной бытовой техники	Выбор оборудования классов A++ и выше для снижения базового потребления

Внедрение систем интеллектуального управления освещением	Автоматизация выключения/включения света, особенно в местах общего пользования
Установка приборов учета электроэнергии и тепла	Повышение контроля и выявление нерационального потребления
Организационные меры	Проведение энергоаудитов и сертификация зданий
Создание программ микрофинансирования для МСБ	Повышение доступности инвестиций в энергосберегающие технологии
Обучение персонала объектов туризма	Внедрение практик бережного потребления энергии и водных ресурсов

Предлагаемые меры основаны на результатах оценки в рамках научно-исследовательской работы ИРН АР19676336 «Разработка и внедрение принципов устойчивого туризма при рекреационном освоении территории Павлодарской области» и учёте региональной специфики – удалённости от централизованных сетей, сезонности турпотоков и типовой архитектуры зданий туристического сектора. Наибольший эффект достигается за счёт утепления зданий, замены источников света и модернизации котельного оборудования.

Также рекомендуется использовать механизмы компенсации остаточных выбросов через локальные офсетные проекты – например, лесовосстановление, агролесомелиорацию и поддержку ВИЭ в сельских поселениях.

Результаты и обсуждение

Учитывая остаточные выбросы CO₂, которые невозможно устранить только техническими мерами в краткосрочной перспективе, актуальной становится реализация климатических офсетных проектов, направленных на добровольную компенсацию эмиссий за счёт дополнительных мероприятий в рамках или за пределами туристического сектора.

Для туристической отрасли Казахстана целесообразными офсетными мерами являются:

- Посадка деревьев и восстановление природных экосистем (например, сосновых лесов в Павлодарском Прииртышье);
- Проекты по внедрению ВИЭ в зданиях и базах отдыха (солнечные коллекторы, малые СЭС);
- Улучшенное управление органическими отходами и их компостирование (уменьшение CH₄);
- Программы энергоаудита с сертификацией и обучением (в рамках стандартизованных офсетных методик);

– Замена угольного отопления на биомассу/электроотопление, сертифицируемое по стандартам VCS или GS.

Применение офсетов позволяет достичь нейтральности по Score 1–2, особенно в сезоны пиковых нагрузок.

В рамках оценки углеродного следа Баянаульского туристического кластера (Павлодарская область) был предложен пилотный офсетный проект по восстановлению соснового массива на деградированных землях, с возможностью регистрации по требованиям Gold Standard. Проект предполагает посадку 50 га лесных культур с расчетным поглощением до 12 000 т CO₂-экв. за 30 лет, что позволяет компенсировать до 50 % текущих выбросов сектора в регионе [12, с.71].

Алгоритм реализации офсетного проекта

Реализация климатических офсетов требует соблюдения международных процедур MRV (Monitoring, Reporting, Verification):

1 Формирование концепции проекта: определение типа мероприятия, географии, объема сокращений;

2 Выбор методологии и регистратора: например, методики Gold Standard (Gold Standard., 2022), VCS (Verra. Verified Carbon Standard Program), Plan Vivo [13;14];

3 Разработка проектной документации (PDD) с расчетами сокращений;

4 Валидация независимым органом (DOEs);

5 Реализация проекта и мониторинг результатов по установленному графику;

6 Верификация достигнутых результатов;

7 Регистрация сокращений и выпуск единиц сокращений выбросов (VERs/VCUs);

8 Монетизация через продажу на добровольных рынках углеродных единиц (в том числе в рамках ESG-инициатив туроператоров и гостиничных сетей).

Учитывая текущие цены на добровольных рынках (\$6–15/т CO₂-экв.), пилотные проекты в Павлодарской области могут обеспечить дополнительный доход и сформировать локальный рынок «зелёного туризма», где углеродная нейтральность становится частью маркетинговой стратегии.

Развитие устойчивого и низкоуглеродного туризма в регионах Казахстана требует системной поддержки со стороны государства, а также стимулирования частных инвестиций. На основе проведённого анализа углеродного следа и оценки технических возможностей снижения выбросов в туристическом секторе Павлодарской области, сформулированы следующие рекомендации:

1 Разработка региональных программ поддержки «зелёного туризма», включая:

– предоставление субсидий и грантов на энергоэффективизацию туристических объектов;

– внедрение механизмов «зелёного микрофинансирования» для малого бизнеса;

– формирование стандартов устойчивых туристических дестинаций.

2 Интеграция оценки углеродного следа в практику регионального управления, включая обязательную отчётность по Score 1–2 для объектов размещения и экскурсионной инфраструктуры в рамках ESG-инициатив.

3 Создание регионального реестра офсетных проектов, зарегистрированных по международным стандартам (VCS, Gold Standard), с возможностью покупки углеродных единиц туроператорами, гостиницами и бизнесом, заинтересованными в достижении климатической нейтральности.

4 Стимулирование частных инвестиций через налоговые преференции и компенсационные схемы для бизнеса, вкладывающегося в энергоэффективные и климатически эффективные технологии.

5 Развитие системы подготовки кадров и экспертов, включая энергоаудиторов, специалистов по климатическому финансированию и разработчиков офсетных проектов в туристических регионах.

Информация о финансировании

Данное исследование финансируется Комитетом науки Министерства науки и высшего образования Республики Казахстан (грант № AP19676336)

Выводы

Проведённая в данной статье комплексная оценка углеродного следа туристического сектора Павлодарской области позволила выделить основные источники выбросов, проанализировать их структуру и определить энергетические узкие места. Установлено, что прямые и косвенные выбросы (Score 1 и Score 2) формируются преимущественно за счёт неэффективных систем отопления, плохой теплоизоляции зданий, отсутствия современных систем учёта и управления энергией.

Предложен перечень технических и организационных решений, реализация которых позволяет сократить выбросы на 30–50 % в краткосрочной перспективе. Дополнительно рассмотрены возможности внедрения климатических офсетных проектов, включая опыт пилотных инициатив по восстановлению лесных экосистем и запуску механизмов компенсации остаточных выбросов.

Представленные результаты могут быть использованы как основа для разработки региональных и национальных стратегий по декарбонизации туризма, а также для подготовки инвестиционных проектов с участием

международных механизмов климатического финансирования. Формирование устойчивого и конкурентоспособного туристического сектора требует сочетания технологических решений, институциональных изменений и политической воли.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1 **Yessimova, D., Faurat, A., Belyy A., Yessim, A.; Sadykov, Z.** Environmental Sustainability and Carbon Footprint of Tourism : A Study of a Natural Park in Northeastern Kazakhstan. Sustainability 2025. – 17. – 1723. [Электронный ресурс]. – URL: – <https://doi.org/10.3390/su17041723>

2 **Bakdolotov, A.** Energy sector for green transitioning. Integrated Policy Strategies and Regional Policy Coordination for Resilient, Green and Transformative Development: Supporting Selected Asian BRI Partner Countries to Achieve 2030 Sustainable Development Agenda Project Paper No. 23. Apr. – 2025. [Электронный ресурс]. – URL: – https://unctad.org/system/files/information-document/unda2030d23-kazakhstan-energy-sector_en.pdf?utm_source=chatgpt.com

3 **Lenzen, M., Sun, Y.-Y., Faturay F., Ting Y.-P., Geschke A., Malik A.** The carbon footprint of global tourism // Nature Climate Change. – 2018. – Vol. 8. – P. 522–528. [Электронный ресурс]. – URL: – <https://doi.org/10.1038/s41558-018-0141-x>

4 **Lenzen, M., Malik A., Li M., Kanemoto, K. et al.** Drivers of global tourism carbon emissions // Nature Communications. – 2024. – Vol. 15. – Article 54582.

5 Book Review of «Tourism and Water» by S. Gössling, C. M. Hall and D. Scott, Journal of Tourism Futures, – Vol. 3 – Issue: 1. – P.81–82. – Journal of Tourism Futures. – Vol. 3 Issue : 1. P. 81–82.

6 **Alhawamdeh, M., López-Mesa B., Emekci, T.** On the way to sustainable energy management in tourism // Journal of Cleaner Production. – 2023. – Vol. 325. – Article 129730. [Электронный ресурс]. – URL: – <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2021.129730>

7 **Kanwal, N., Meng, C. S., Watabe, M., Raza, M. Y.** Carbon Footprint of Tourism Activities Including Transportation, Accommodation and Infrastructure: A Critical Analysis // Journal of Sustainable Tourism. – 2024.

8 Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC). 2006 IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories. Volume 2: Energy. – IGES, Japan. – [Электронный ресурс]. – URL: – <https://www.ipcc-nggip.iges.or.jp/public/2006gl/vol2.html>

9 **Бельй, А. В., Сергазинова, М. К.** К вопросу об углеродной нейтральности и возможностях перехода к ней Павлодарской области // Материалы международной научно-практической конференции «XIII

Торайғыровские чтения». Том 1. – Павлодар: Торайғыров Университеті, 2021. – С. 192–201.

10 UNWTO. Baseline Report on Climate Action in Tourism Sector. – World Tourism Organization, – 2021. – 65 p. – [Электронный ресурс]. – URL: – <https://www.unwto.org/sustainable-development/climate-action>

11 **Есимова, Д. Д., Бельй, А. В., Фаурат, А. А., Есім, А. Қ., Джанаргалиева М. Р.** Повышение энергоэффективности объектов туризма, как вклад в декарбонизацию отрасли // Вестник Торайғыров университета, Энергетическая серия. – № 4. – 2023. С. 121–134.

12 **Бельй, А. В., Цой, С. К.** К вопросу о торговле парниковыми газами от проектов по энергоэффективности в Республике Казахстан // Гидрометеорология и образование. Ежеквартальный научно-образовательный журнал. – 2021. – № 4. – С. 64–77.

13 Gold Standard. How to Offset Carbon Emissions with GS-Certified Projects. – 2022. [Электронный ресурс]. – URL: – <https://www.goldstandard.org/>

14 Verra. Verified Carbon Standard Program. – [Электронный ресурс]. – URL: – <https://verra.org/project/vcs-program/>

REFERENCES

1 **Yessimova, D., Faurat, A., Belyy, A., Yessim, A., Sadykov, Z.** Environmental Sustainability and Carbon Footprint of Tourism: A Study of a Natural Park in Northeastern Kazakhstan. Sustainability 2025. – 17. – 1723. [Electronic resource]. – URL: – <https://doi.org/10.3390/su17041723>

2 **Bakdolotov, A.** Energy sector for green transitioning. Integrated Policy Strategies and Regional Policy Coordination for Resilient, Green and Transformative Development: Supporting Selected Asian BRI Partner Countries to Achieve 2030 Sustainable Development Agenda Project Paper No. 23. Apr. – 2025. [Electronic resource]. – URL: – https://unctad.org/system/files/information-document/unda2030d23-kazakhstan-energy-sector_en.pdf?utm_source=chatgpt.com

3 **Lenzen, M., Sun, Y. Y., Faturay F., Ting Y.-P., Geschke A., Malik A.** The carbon footprint of global tourism // Nature Climate Change. – 2018. – Vol. 8. – P. 522–528. [Electronic resource]. – URL: – <https://doi.org/10.1038/s41558-018-0141-x>

4 **Lenzen M., Malik A., Li M., Kanemoto K. et al.** Drivers of global tourism carbon emissions // Nature Communications. – 2024. – Vol. 15. Article 54582.

5 Book Review of «Tourism and Water» by S. Gössling, C. M. Hall and D. Scott, Journal of Tourism Futures. – Vol. 3 – Issue: 1. – P. 81–82.

6 **Alhawamdeh, M., López-Mesa B., Emekci T.** On the way to sustainable energy management in tourism // Journal of Cleaner Production. – 2023. –

Vol. 325. – Article 129730. [Electronic resource] – URL: – <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2021.129730>

7 Kanwal, N., Meng, C. S., Watabe, M., Raza M. Y. Carbon Footprint of Tourism Activities Including Transportation, Accommodation and Infrastructure: A Critical Analysis // Journal of Sustainable Tourism. – 2024.

8 Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC). 2006 IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories. Volume 2: Energy. – IGES, Japan. – [Electronic resource]. – URL: – <https://www.ipcc-nggip.iges.or.jp/public/2006gl/vol2.html>

9 Belyi, A. V., Sergazinova, M. K. K voprosu ob uglerodnoy neytral'nosti i vozmozhnostyakh perekhoda k ney Pavlodarskoy oblasti // Materialy mezhdunarodnoy nauchno-prakticheskoy konferentsii «XIII Toraygyrovskie chteniya». Tom 1. – Pavlodar: Toraygyrov Universiteti, – 2021. – P. 192–201.

10 UNWTO. Baseline Report on Climate Action in Tourism Sector. – World Tourism Organization. – 2021. – P. 65 – [Electronic resource]. – URL: – <https://www.unwto.org/sustainable-development/climate-action>

11 Yessimova, D. D., Belyi A. V., Faurat, A. A., Yessim, A. K., Janargaliyeva M. R. Povyshenie energoeffektivnosti ob'ektov turizma, kak vklad v dekarbonizatsiyu otrasli // Vestnik Toraygyrov universiteta, Energeticheskaya seriya. – № 4 2023, – P. 121–134.

12 Belyi, A. V, Tsoy, S. K. K voprosu o torgovle parnikovymi gazami ot proektov po energoeffektivnosti v Respublike Kazakhstan // Gidrometeorologiya i obrazovaniye. Ezhekvartal'nyy nauchno-obrazovatel'nyy zhurnal. – 2021. – № 4. P. 64–77.

13 Gold Standard. How to Offset Carbon Emissions with GS-Certified Projects. – 2022. [Electronic resource]. – URL: – <https://www.goldstandard.org/>

14 Verra. Verified Carbon Standard Program. – [Electronic resource]. – URL: – <https://verra.org/project/vcs-program/>

Поступило в редакцию 30.06.25.

Поступило с исправлениями 12.09.25.

Принято в печать 05.12.25.

Д. Д. Есимова¹, *А. В. Белый², А. А. Фаурат³,

А. Қ. Есім⁴, М. Р. Джанарғалиева⁵

^{1,2,3,4,5}Торайғыров университеті,

Қазақстан Республикасы, Павлодар қ.

30.06.25 ж. баспаға түсті.

12.09.25 ж. түзетулерімен түсті.

05.12.25 ж. басып шығаруға қабылданды.

Өңірлік туризм саласындағы энергия тұтынуға байланысты CO₂ шығарындыларын бағалау және азайту бойынша ұсыныстар

Бұл мақалада Павлодар облысының туризм саласындағы парниктік газдардың энергетикалық шығарындыларының негізгі көздері қарастырылады. Негізгі назар туризм секторындағы көміртегі ізіне GHG Protocol әдістемесі бойынша жүргізілген талдауға аударылған. Әсіресе Scope 1 (отын жағудан тікелей шығарындылар) және Scope 2 (электр және жылу энергиясын тұтынудан туындайтын жанама шығарындылар) шеңберіндегі шығарындыларға ерекше көңіл бөлінген. Зерттеу барысында шығарындылардың сандық бағасы ұсынылып, ең ірі әсер көздері анықталды. Сонымен қатар, мақалада туризм нысандарының энергия тиімділігін арттыру бойынша нақты шаралар ұсынылады, соның ішінде төмен көміртекті және энергия үнемдейтін технологияларды енгізу, жаңартылатын энергия көздерін (ЖЭК) кеңінен қолдану, сондай-ақ климаттық өтемақы жобаларын іске асыру қарастырылған. Талдау негізінде жүйелі тәсіл мен бизнес пен мемлекеттің тұрақты бастамаларын қолдау жағдайында өңірдің туризм саласының энергетикалық сегментінде шығарындыларды едәуір азайту әлеуеті бар деген қорытынды жасалды.

Кілтті сөздер: көміртегі ізі, туризм, энергия тиімділігі, CO₂ шығарындылары, Scope 1–2, декарбонизация, Павлодар облысы

D. D. Yessimova¹, *A. V. Belyi², A. A. Faurat³, A. Q. Yessim⁴, M. R. Janargaliyeva⁵
^{1,2,3,4,5}Toraighyrov University, Republic of Kazakhstan, Pavlodar.

Received 30.06.25

Received in revised form 12.09.25

Accepted for publication 05.12.25.

ASSESSMENT AND RECOMMENDATIONS FOR REDUCING ENERGY-RELATED CO₂ EMISSIONS IN REGIONAL TOURISM

This article examines the key sources of energy-related greenhouse gas emissions in the tourism industry of the Pavlodar region. The main focus is on analyzing the carbon footprint of the tourism sector using the GHG Protocol methodology. Particular attention is given to emissions under Scope 1 (direct emissions from fuel combustion) and Scope 2 (indirect

emissions from the consumption of electricity and heat). The study provides quantitative assessments of emissions and identifies the major sources of impact. In addition, the article proposes practical measures to improve energy efficiency at tourism facilities, including the implementation of low-carbon and energy-efficient technologies, expansion of the use of renewable energy sources (RES), and the development of climate compensation projects. Based on the analysis, conclusions are drawn about the significant potential for emission reductions in the energy segment of the region's tourism sector; provided a systematic approach is adopted and sustainable initiatives are supported by both businesses and the government.

Keywords: carbon footprint, tourism, energy efficiency, CO₂ emissions, Scope 1–2, decarbonization, Pavlodar region.

МРНТИ 06.35.51

<https://doi.org/10.48081/JOWR9207>***У. К. Жалмагамбетова¹, Р. В. Ташлыкова², В. А. Ларкин³**¹Торайғыров университет, Республика Казахстан, г. Павлодар;^{2,3}ТОО НПФ «СевКазЭнергоПром», Республика Казахстан, г. Павлодар.¹ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-2261-2222>²ORCID: <https://orcid.org/0009-0004-7285-9305>³ORCID: <https://orcid.org/0009-0008-2079-3358>*e-mail: ultuara@mail.ru

ВОЗМОЖНОСТИ СОЗДАНИЯ ПРОГРАММНОГО ОБЕСПЕЧЕНИЯ ДЛЯ ГИДРАВЛИЧЕСКОГО И ТЕПЛООВОГО РАСЧЁТОВ СИСТЕМ ТЕПЛОСНАБЖЕНИЯ

В статье рассматривается возможность разработки программного обеспечения для гидравлических и тепловых расчётов систем теплоснабжения. Актуальность темы обусловлена необходимостью оптимизации систем теплоснабжения для повышения комфорта проживания, снижения аварийности и повышения надёжности работы систем энергообеспечения.

Создание программного обеспечения для таких расчётов – сложная задача, требующая применения современных методов и подходов. Разработка комплекса интеллектуальных информационно-коммуникационных систем может стать основой для внедрения новых технологий в области теплоснабжения.

Цифровая модель системы теплоснабжения города позволяет учесть множество факторов, влияющих на её работу, и оптимизировать параметры для достижения наилучших результатов. Создание такой модели требует комплексного подхода и взаимодействия специалистов из разных областей. Развитие отечественного программного обеспечения в этой сфере способствует укреплению технологического суверенитета и повышению эффективности систем теплоснабжения.

Любая оптимизация систем теплоснабжения способствует созданию более комфортных условий проживания, а также снижению количества аварийных ситуаций и повышению надёжности работы

систем энергообеспечения. Такая основа для разработки и внедрения новых технологий в области теплоснабжения создает условия для развития технологий отечественного программного обеспечения в этой области.

Ключевые слова: цифровой двойник, теплоснабжение, программное обеспечение, гидравлический расчет, тепловой расчет.

Введение

Создание цифровой модели для эффективного прогнозирования и управления любого технологического процесса является актуальной задачей, так как она решает, в первую очередь, вопросы энергоэффективности и устойчивого развития. Такой запрос в современном мире становится необходимым для оптимизации в частности систем тепло- и водообеспечения [1]. Разработка программного обеспечения, в данном вопросе, для создания динамического виртуального двойника, работающего в режиме реального времени с показаниями состояния действующей системы энергоснабжения является ключевой задачей.

Создание адекватной цифровой модели, которая как живой организм будет отражать все процессы, протекающие в действующей системе, позволит производить точные гидравлические и тепловые расчеты, и учитывать все внешние и внутренние факторы, влияющие на функционирование системы. Точные расчеты мгновенно позволяют оптимизировать работу систем теплоснабжения, что способствует снижению энергопотребления и затрат на отопление [2]; [3]. В условиях роста цен особенно важно контролировать энергоресурсы, а также необходимо учитывать снижения воздействия на окружающую среду [4].

Если программное обеспечение разработать с учетом особенностей конкретного региона, это позволит точно оптимизировать и прогнозировать систему с учетом климатических, инфраструктурных и других влияющих факторов. Что в свою очередь ведет к снижению затрат и минимизации потерь тепла, расходов на эксплуатацию и обслуживание системы. Данное программное обеспечение особенно актуально для бюджетных организаций и предприятий. Создание современного программного обеспечения для расчетов систем теплоснабжения позволит обеспечить соответствие этих систем всем требованиям их эффективной и безопасной работы

Материалы и методы

Объектом разработки научно-исследовательской работы является создание отечественного программного обеспечения (далее ПО), под рабочим названием «HeatingSystem», для гидравлического и теплового расчетов систем теплоснабжения на примере города Павлодар.

Разработанное программное обеспечение, которое будет соответствовать современным требованиям и стандартам [5], должно учитывать особенности систем теплоснабжения в городе Павлодар. Для достижения поставленной цели необходимо в первую очередь изучить существующие методы и подходы к гидравлическим и тепловым расчетам систем теплоснабжения. На основании этого разработать алгоритмы и модели, которые позволят проводить расчеты с учётом специфики города [6].

Создание прототипа программного обеспечения «HeatingSystem» и его тестирование возможно при оптимизации алгоритмов и модели на основе полученных результатов тестирования. Что позволит разработать документацию и инструкции для пользователей ПО «HeatingSystem».

Для решения поставленных задач используются такие методы, как анализ научной литературы и публикаций по теме исследования, моделирование и симуляция гидравлических и тепловых процессов, программирование и разработка алгоритмов, тестирование и оптимизация программного обеспечения. При этом разработка ПО «HeatingSystem» позволит повысить точность и эффективность гидравлических и тепловых расчетов, оптимизировать работу систем теплоснабжения в городе Павлодар, снизить энергопотребление и затраты на отопление и улучшить качество жизни горожан.

Создание любой цифровой модели системы теплоснабжения города можно считать сложным и многоэтапным процессом, требующим системного подхода [7]. Для такой задачи лучше всего использовать методологию системного моделирования в сочетании с цифровыми технологиями моделирования, такими как GIS (Geographic Information Systems) с применением математического и имитационного моделирования для анализа режимов работы системы теплоснабжения, для имитации и замены реальных объектов математическими моделями.

Методология создания цифровой модели системы теплоснабжения города включает в себя формулирование целей и задач моделирования. Определение целей возможно при анализе режимов теплоснабжения, оптимизации, диагностике, планировании развития. Далее идет уточнение задач, то есть какие объекты моделируются, какие параметры нас интересуют, в нашем случае расходы, температуры, давления, теплопотери [8].

Последовательный сбор и подготовка исходных данных опирается на топологию системы, это тепловые сети, центральные тепловые пункты, индивидуальные тепловые пункты и потребители. Необходимо также учитывать географическую информацию, это – карты, координаты, геометрия трасс, и техническую характеристику оборудования, то есть диаметры труб, теплоизоляция, насосы, теплообменники. При моделировании учитывается

информация с архивов данных, температурные графики, погодные условия, режимы работы, данные о потреблении тепла. При этом необходимо уточнять используются ли ГИС-системы, BIM-модели, SCADA-данные, архивы эксплуатации.

Выбор программного обеспечения и инструментов моделирования включает в себя ГИС-платформы, программы тепло- гидравлического моделирования (ТГИД-05, гидросистема, ZuluGIS и т.д.), программы для визуализации и анализа данных MS Excel, MS Access Database и т.д. Построение цифровой топологической модели включает в себя создание схемы трубопроводов, источников тепла и потребителей, введение узлов, таких как узлы разветвления, регулирования. Для визуализации связей с геоданными, наложенными на карте, необходимо учитывать геометрию трасс, диаметр труб, геодезические отметки и тепловые нагрузки [9].

Рассмотрим переложенную базу данных, изображенную на рисунке 1, содержащую геометрию трасс тепловых сетей города Павлодара на примере магистральных участков, а также внутриквартальных сетей северной части города.



Рисунок-1 – Схема тепловых сетей г. Павлодара (ПО «HeatingSystem»)

Для исследования сходимости результатов расчета в ПО «HeatingSystem» создан тождественный цифровой двойник на рисунке 2 в ПО ZuluGIS с аналогичными техническими и режимными параметрами такими как давление и температура на источниках тепла.



Рисунок-2 – Схема тепловых сетей г.Павлодара (ПО ZuluGIS)

Для тестового режима сходимости результатов расчета ПО был принят участок внутриквартальных сетей, проект которого разрабатывался ТОО НПФ «СЕВКАЗЭНЕРГОПРОМ» «Реконструкция внутриквартальных тепловых сетей в г. Павлодаре». Для апробации модели была использована первая очередь, тепловая сеть от ТК-145 до ввода в ж/д в границах улицы Ломова, 1 Мая, Гагарина, 2022 г., протяженностью $L=2,25$ км.

Результаты и обсуждение

Для реализации проекта предварительно необходимо уделить внимание математическому и физическому моделированию. Моделирование необходимо для описания гидравлического расчета с учетом регулируемых параметров – напоры, давления, расходы, а также теплотехнического расчета, с учетом потерь тепла и температуры. Математическая модель создается с использованием уравнений теплового баланса и уравнений движения жидкости. При описании процессов применяется имитационное моделирование с решением систем нелинейных уравнений [10].

Одним из важных моментов является калибровка модели, то есть сопоставление результатов расчетов с фактическими данными, уточнение параметров моделей, это коэффициенты теплоотдачи, сопротивления, шероховатости и т.д. Проверка адекватности моделирования возможна с использованием исторических данных и данных мониторинга. Важным этапом моделирования является анализ режимов и сценариев, таких как нормальные и аварийные режимы, сезонные колебания, сценарии развития, возможно рост потребления и реконструкция сетей. При этом корректировка модели должна быть проведена с целью оптимизации и снижения потерь, учитывая энергоэффективность регулирования.

Важным моментом цифровой модели является интерфейс и визуализация – это интерактивные карты, 2D-визуализация, визуализация режимов работы в реальном времени с использованием SCADA пакетов. Основным результатом создания цифровой модели будет отражен в веб-интерфейсе для доступа заинтересованных сторон.

Разработка цифрового двойника учитывает интеграцию с другими системами – SCADA-пакеты, системы диспетчеризации и планирования ремонтов. Актуализация и сопровождение модели включает регулярное обновление данных. К ним могут быть причислены строительство, ремонты, изменения в нагрузке, интеграция с системой технического обслуживания и планирования.

Информация о финансировании Работа была выполнена при поддержке Комитета науки Министерства науки и высшего образования Республики Казахстан в рамках проекта программно-целевого финансирования на 2024–2026 годы № BR24992907 «Разработка программного продукта для цифровизации и оптимизации работы системы теплоснабжения городов Казахстана».

Выводы

Создание отечественного ПО для гидравлического и теплового расчётов систем теплоснабжения является важной задачей, которая требует комплексного подхода и междисциплинарных исследований. Разработка

такого ПО позволит не только оптимизировать работу существующих систем, но и создать основу для развития новых технологий в области теплоснабжения. Внедрение такой цифровой модели на примере города Павлодар позволит оптимизировать функционирование систем тепло- и водоснабжения.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

- 1 СП РК 4.02-104-2013 Тепловые сети // г. Астана, 2015.
- 2 СП РК 4.02-102-2012 Проектирование тепловой изоляции оборудования и трубопроводов г. Астана, 2015.
- 3 СП РК 2.04-01-2017 Строительная климатология г. Астана, 2017.
- 4 СП РК 4.02-108-2014 Проектирование тепловых пунктов г. Астана, 2017.
- 5 Приложение 44 к приказу Министра энергетики РК от 30.12.2016 №580 «Методические указания определения тепловых потерь в сетях».
- 6 **Идельчик, И. Е.**, Справочник по гидравлическим сопротивлениям. М. : «Машиностроение». – 1992.
- 7 **Меренков, А. П., Хаселев, В. Я.**, Теория гидравлических цепей. // Издательство «Наука». – 1985.
- 8 **Коршак, А. А.**, Универсальность обобщенной формулы Л.С.Лейбензона / А.А.Коршак. Нефтяное хозяйство. – 2019. – № 5. – С. 105–108. – Библиогр. : С.108 (17 назв.). – ISSN 0028-2448
- 9 **Берж, К.**, Теория графов и ее применения. // Изд-во иностр.лит., 1962. – 320 с.
- 10 **Maurer, J., Ratzel, O. M., Malan, A. J., Hohmann S.**, Comparison of discrete dynamic pipeline models for operational optimization of District Heating Networks. / Energy Reports. – Vol. 7. – Supplement 4. – October 2021. – P. 244–253. – doi: <https://doi.org/10.1016/j.egy.2021.08.150>

REFERENCES

- 1 SP RK 4.02-104-2013 Teplovye seti [Code of Practice of the Republic of Kazakhstan Heating networks] // Astana, – 2015.
- 2 SP RK 4.02-102-2012 Proyektirovaniye teplovoy izolyatsiyi oborudovaniya i truboprovodov [Code of Practice of the Republic of Kazakhstan 4.02-102-2012 Design of thermal insulation for equipment and pipelines] // Astana, – 2015.
- 3 SP RK 2.04-01-2017 Stroitel'naya klimatologiya [Code of Practice of the Republic of Kazakhstan 2.04-01-2017 building climatology] // Astana, – 2017.

4. SP RK 4.02-108-2014 *Proyektirovaniye teblovykh punktov* [Code of Practice of the Republic of Kazakhstan 4.02-108-2014 Design of heating stations] // Astana, – 2017.

5 Prilozheniye 44 k prikazu Ministra energetiki RK ot 30.12.2016 №580 «Metodicheskiye ukazaniya opredeleniya teblovykh poter' v setyakh» [Appendix 44 to the order of the Minister of Energy of the Republic of Kazakhstan dated December 30. – 2016 No. 580 «Guidelines of determining heat losses in network».]

6 Idelchik, I.Ye., *Spravochnik po gidravlicheskim soprotivleniyam* [Handbook of hydraulic resistance]. – М.: «Mechanical engineering». 1992.

7 **Mererkov, A. P., Khaselev V. Ya.**, *Teoriya Gidravlicheskih tsepei*. [Theory of hydraulic circuits]. – «Nauka» publishing office, – 1985

8 **Korshak, A. A.**, *Universalnost' obobshchonnoy formuly L. S.Leybensona* [The universality of generalized Leybeson's formula] / A. A.Korshak // *Oil industry* – 2019. – № 5. – P. 105–108. – Bibliogr.: P.108 (17 titles.). – ISSN 0028-2448.

9 **Berzh, K.**, *Teoriya graphov i eyo primeniye*. [Graph theory and its application] // Publishing house of foreign lit., 1962. – 320 p.

10 **Maurer, J., Ratzel, O. M., Malan, A. J., Hohmann, S.**, *Comparison of discrete dynamic pipeline models for operational optimization of District Heating Networks*. *Energy Reports*. Vol. 7. – Supplement 4. – October 2021. – P. 244–253. – <https://doi.org/10.1016/j.egy.2021.08.150>

Поступило в редакцию 16.10.25.

Поступило с исправлениями 24.10.25.

Принято в печать 05.12.25.

*Ұ. К. Жалмағамбетова¹, Р. В. Ташлыкова², В. А. Ларкин³

¹Торайғыров университеті, Қазақстан Республикасы, Павлодар қ.;

^{2,3}«СевКазЭнергоПром», НПФ ЖШС,

Қазақстан Республикасы, Павлодар қ.

16.10.25 ж. баспаға түсті.

24.10.25 ж. түзетулерімен түсті.

05.12.25 ж. басып шығаруға қабылданды.

ЖЫЛУМЕН ЖАБДЫҚТАУ ЖҮЙЕЛЕРІНІҢ ГИДРАВЛИКАЛЫҚ ЖӘНЕ ЖЫЛУЛЫҚ ЕСЕПТЕУЛЕРІ ҮШІН БАҒДАРЛАМАЛЫҚ ҚАМТАМАСЫЗ ЕТУДІ ҚҰРУ МҮМКІНДІКТЕРІ

Бұл мақалада жылумен жабдықтау жүйелерінің гидравликалық және жылулық есептеулері үшін бағдарламалық қамтамасыз етуді әзірлеудің орындылығы қарастырылады. Бұл тақырыптың

өзектілігі өмір сүру жайлылығын жақсарту, апаттарды азайту және энергиямен жабдықтау жүйелерінің сенімділігін арттыру үшін жылумен жабдықтау жүйелерін оңтайландыру қажеттілігінен туындайды.

Мұндай есептеулер үшін бағдарламалық қамтамасыз етуді құру қазіргі заманғы әдістер мен тәсілдерді қолдануды талап ететін күрделі міндет болып табылады. Интеллектуалды ақпараттық-коммуникациялық жүйелер кешенін дамыту жылумен жабдықтаудың жаңа технологияларын енгізуге негіз бола алады.

Қаланың жылумен жабдықтау жүйесінің цифрлық моделі оның жұмысына әсер ететін көптеген факторларды қарастыруға және ең жақсы нәтижелерге қол жеткізу үшін параметрлерді оңтайландыруға мүмкіндік береді. Мұндай модельді құру кешенді көзқарас пен әртүрлі сала мамандарының ынтымақтастығын талап етеді. Осы саладағы отандық бағдарламалық қамтамасыз етуді дамыту технологиялық егемендікті нығайтуға және жылумен жабдықтау жүйелерінің тиімділігін арттыруға ықпал етеді.

Жылумен жабдықтау жүйелерін кез келген оңтайландыру өмір сүруге қолайлы жағдайлар жасауға, сондай-ақ апаттар санын азайтуға және энергиямен жабдықтау жүйелерінің сенімділігін арттыруға ықпал етеді. Жылумен жабдықтаудың жаңа технологияларын әзірлеу мен енгізудің бұл негізі осы саладағы отандық бағдарламалық технологияларды дамытуға жағдай жасайды.

Кілтті сөздер: сандық егіз, жылумен жабдықтау, бағдарламалық қамтамасыз ету, гидравликалық есептеу, жылулық есептеу

*U. Zhalmagambetova¹, R. Tashlykova², V. Larkin³

¹Toraighyrov University, Republic of Kazakhstan, Pavlodar;

^{2,3}NPF LLC «SevKazEnergoProm», Republic of Kazakhstan, Pavlodar.

Received 16.10.25.

Received in revised form 24.10.25.

Accepted for publication 05.12.25.

THE POSSIBILITIES OF CREATION OF SOFTWARE FOR HYDRAULIC AND THERMAL CALCULATIONS OF HEAT SUPPLY SYSTEM

The article views the feasibilities in software developing for hydraulic and thermal calculations of heat supply systems. The relevance of this topic is conditioned by necessity of heat optimization system to increase

the quality of living, reduction of accidents and enhance the reliability of energy supply system.

The creation of software, provided for these calculations is difficult objective, requiring the usage of modern methods and approaches. Development of the informational communicational intellectual system may become the fundament of new technologies in heat supply sphere.

Digital model of city's heat supply system allows taking into account the set of factors that interferes in its work and optimizing the parameters to achieve the best results. Creating this model requires the complex approaches and interaction between specialists from diverse fields of study. The development of homeland software in this field contributes in strengthening of technological sovereignty and growth of efficiency of heat supply system.

Any optimization of the heat supply system contributes to create more comfort conditions of living and to reduce the amount of accidents, and to increase of quality of system operation. The giving fundament creates the conditions to develop the improvement of the technologies of homeland software in this field.

Keywords: digital twin, heat supply, software, hydraulic calculation, thermal calculation.

МРНТИ 75.31.23

<https://doi.org/10.48081/КСКК2356>

***М. Ш. Иманеев¹, А. А. Сафарбаков², С. И. Олейник³**

¹ТОО «Павлодарские тепловые сети»,

Республика Казахстан, г. Павлодар;

²ТОО «Павлодартепэнерго» Республика Казахстан, г. Павлодар;

³ТОО «ЭНЭКО» г. Павлодар.

¹ORCID: <https://orcid.org/0009-0000-1044-5212>

²ORCID: <https://orcid.org/0009-0007-4104-3225>

³ORCID: <https://orcid.org/0009-0009-8007-7166>

*e-mail: pvl_pte@mail.ru

ПОВЫШЕНИЕ НАДЕЖНОСТИ ТЕПЛОСНАБЖЕНИЯ В УСЛОВИЯХ ПОВЫШЕННОГО ИЗНОСА ТЕПЛОВЫХ СЕТЕЙ

В данной статье изложены результаты практической корректировки гидравлического режима тепловых сетей для повышения надежности и безопасности их функционирования в условиях высокой степени износа трубопроводов. В статье приводится причинно-следственная связь принимаемых технических и организационных решений. Дано общее описание предлагаемых технических решений. Основная идея статьи – это необходимость и возможность осуществления последовательных шагов перехода от качественного способа регулирования количества тепла, поставляемого потребителям городской агломерации, к комбинированному – качественно-количественному способу регулирования. Рассматривается возможность реализации данного способа регулирования с минимальными изменениями проектных схем. При этом безопасность эксплуатации тепловых сетей и надежность (безотказность) их работы в течение всего отопительного периода рассматриваются в неразрывной связи с экономической и энергетической эффективностью.

Статья имеет целью ознакомление с положительным опытом и предназначена для инженерно-технического и руководящего состава тепловых сетей, проектных, конструкторских и наладочных организаций. Материал статьи может быть использован для изучения

студентами старших курсов бакалавриата и магистрантами по специальностям «Теплоэнергетика» (6В07105, 6В07111 и 7М07106) и «Теплоэнергетика и устойчивое развитие» (6В07177).

Ключевые слова: эксплуатация тепловых сетей, количественное регулирование, качественное регулирование, теплоснабжение, тепловыпадение.

Введение

Основной проблемой эксплуатации тепловых сетей в настоящее время является их высокая изношенность. Такая ситуация стала следствием жесткой тарифной политики, когда средств, предусмотренных тарифом, хватало на ремонт не более 1 % от общей протяженности сетей в год, при минимально необходимых для поддержания работоспособности 4 % в год. Такая ситуация типична не только для Павлодарского региона, но и для других регионов Республики Казахстан и Российской Федерации [1–4].

В результате износ тепловых сетей в г. Павлодаре превысил 90 %, следствием чего стала высокая аварийность. Тепловые сети города Павлодара проектировались, монтировались и вводились в эксплуатацию преимущественно в 60-е и 70-е годы прошлого столетия и рассчитывались на способ регулирования путем изменения на источниках (ТЭЦ) температуры теплоносителя при относительном постоянстве расходов (качественное регулирование). При расчетном температурном графике для г. Павлодара 130/70 °С (проектном - 150/70 °С) по мере роста аварийности тепловых сетей были приняты решения о последовательном переходе на график 120/60 °С, а затем и 110/60 °С.

Тем не менее, рост аварийности продолжался, и были предприняты попытки определения критических факторов, влияющих на надежность работы тепловых сетей с целью последующей разработки мер по стабилизации и улучшению показателей качества работы тепловых сетей.

Материалы и методы

Анализ сложившейся ситуации и проработка вариантов решения

Исследования показали, что максимумы аварийности приходятся на резкие изменения температуры теплоносителя в соответствие температурного графика при изменении температуры наружного воздуха. Всплески аварийности наблюдаются как при повышении температуры теплоносителя, так и при ее понижении.

Пример зависимости аварийности от температуры теплоносителя за осенне-зимний период 2020–2021 г.г. приведен на рисунке 1.

На приводимых здесь диаграммах отражена повторяемость следующей ситуации: увеличение температуры прямой сетевой воды, сопровождается ростом аварийных отключений и, как следствие, ростом расхода подпиточной

(селитебной зоне). При изменении температурного графика до 95/60 °С для селитебной зоны и снижении тепловыпадения до Δt 35 °С требуется увеличение расхода теплоносителя для передачи того же количества тепловой энергии до величины 24 000 т/ч. В этом случае на смесительных насосных станциях на границах селитебной зоны к 17 000 т/ч подмешивается из обратного трубопровода 7 000 т/ч, чем и обеспечивается снижение температуры теплоносителя и переход на график 95/60 °С (рисунок 3).

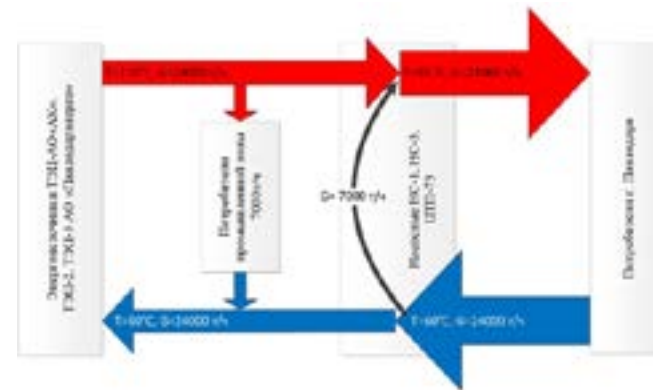


Рисунок 3 – Принципиальная схема работы контуров теплоисточников с дополнительной рециркуляцией на насосных станциях НС-1, НС-3 и ЦТП-73

Как уже говорилось, узлы рециркуляции установлены на границах зон жилой застройки, в существующих насосных станциях. В качестве насосных агрегатов для рециркуляции теплоносителя используются существующие насосные агрегаты станций №№ 1, 2 и ЦТП-73, с незначительной реконструкцией схем обвязки, обеспечивающей разделение напорных линий.

Внешний вид узлов насосных станций №№ 1, 2 и ЦТП-73, на которых выполнены соответствующие технические изменения и дополнения, показан на рисунках 4, 5, 6 и 7.

Ведение эксплуатационного режима по выполненным расчетам было начато в отопительный период 2023–2024 гг., что позволило обеспечить работу энергоисточников по температурному графику 110/60 °С с суммарным расходом теплоносителя до 23 500 т/ч без каких-либо ограничений и получить необходимый объем тепловой энергии от энергоисточников, который потенциально превысил достигнутый максимум прошлых отопительных сезонов примерно на 10 %.

Обеспечение смешивания прямой и обратной сетевой воды на насосных станциях позволило снизить температуру теплоносителя в тепловых сетях внутри селитебной зоны и регулировать величину теплотребления.



Рисунок 4 – Внедрение узла рециркуляции насосов №1 и №2 на насосной станции №1 ТМ-20-32 Южного сетевого района



Рисунок 5 – Внедрение узла рециркуляции в схеме насоса №3 на насосной станции №2 Северного сетевого района



Рисунок 6 – Внедрение узла рециркуляции с применением вертикального насоса ЦТП-73



Рисунок 7 – Внедрение узла рециркуляции на ЦТП-73. Дополнительные связи и врезки

Все это обеспечило более стабильную работу тепловых сетей, снижение аварийности и улучшение гидравлического режима работы квартальных сетей.

Результаты и обсуждение

Результаты этой работы отражает статистика повреждений на тепловых сетях в отопительный сезон и статистика обращений населения в тепловые сети в связи с недогревом. Динамика изменения данных показателей приводится, соответственно, на рисунках 8 и 9.

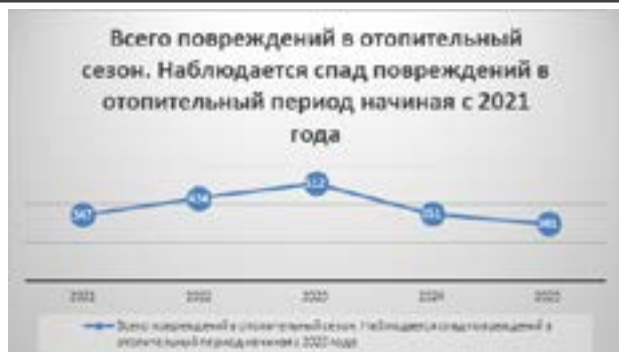


Рисунок 8 – Статистика повреждаемости тепловых сетей до и после внедрения качественно-количественного способа регулирования



Рисунок 9 – Тенденция изменения количества заявок от населения по фактам недогрева

Кроме того, помимо повышения надежности теплоснабжения, данная схема ведения режима способствует улучшению экономических показателей, а именно: снижению потерь гидравлических на отрезке между источником и насосной станцией (в связи со снижением расходов) и тепловых в сетях города в связи со снижением температуры теплоносителя.

Информация о финансировании

Данная работа финансируется Комитетом науки Министерства науки и высшего образования Республики Казахстан (Грант № BR24992907) в части разработки эксплуатационного режима для цифрового двойника тепловых сетей города Павлодара.

Выводы

Таким образом, обоснованный расчетным путем и внедренный в практику в отопительный период 2024–2025 г.г., комбинированный способ

количественно-качественного регулирования отпуска тепла в тепловые сети города за счет рециркуляции обратной сетевой воды в прямую позволил достичь следующих результатов.

Повысилась надежность теплоснабжения при сопоставимой степени износа сетей, что подтверждается ростом отпуска с теплоисточников и снижением числа аварийных отключений в отопительный период.

Улучшилось качество оказания услуги в отношении отопления жилого сектора селитебной зоны, что подтверждается значительным сокращением заявок (жалоб) со стороны населения по сравнению с предыдущими годами с 324 до 159.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1 Теплоснабжение в Казахстане: проблемы и пути решения [Электронный ресурс] / Информационное агентство Inform.kz. – Нур-Султан, 05.08.2022. – [Электронный ресурс]. – https://www.inform.kz/ru/teplosnabzhenie-v-kazahstane-problemy-i-puti-resheniya_a3963511.

2 Терентьева, А. С. Анализ основных проблем централизованного теплоснабжения в России на современном этапе // Научные труды ИНИП РАН. – 2020. – Раздел «Энергетика и инфраструктура». – С. 253–273. – <https://doi.org/10.47711/2076-318-2020-253-273>.

3 Пашенко, Е. И. Анализ причин снижения ресурса тепловых сетей // Новости теплоснабжения. – 2002. – № 12 (28). – С. 33–35.

4 Причины износа тепловых сетей [Электронный ресурс] // Pavlodarenergo.kz. – Публикация №16, ноябрь 2021 г. – [Электронный ресурс]. – <https://pavlodarenergo.kz/ru/press-center/company-news/prichiny-iznosa-teplovyyh-setej.html>.

5 Правила технической эксплуатации электрических станций и сетей. – Утв. приказом Министра энергетики Республики Казахстан № 247 от 30 марта 2015 г.

6 Типовая инструкция по технической эксплуатации тепловых сетей систем коммунального теплоснабжения. – Утв. приказом Госстроя России № 285 от 13.12.2000 г.

7 Энергоэффективность как залог надёжного теплоснабжения потребителей // Sevkazenego.kz. – Публикация №18. – август 2020 г. – [Электронный ресурс]. – <https://www.sevkazenego.kz/ru/press-center/novosti-kompanii/energoeffektivnost-kak-zalog-nadyozhnogo-teplosnabzheniya-potrebiteljev.html>.

8 **Манюк, В. И., Каплинский, Я. И., Хиж, Э. Б., Манюк, А. И., Ильин, В. К.** Наладка и эксплуатация водяных тепловых сетей: справочник. – 3-е изд., перераб. и доп. – М.: Стройиздат, 1988. – 432 с.

9 **Ротов, П. В.** Способы регулирования тепловой нагрузки систем теплоснабжения. Перспективы развития // Новости теплоснабжения. – 2007. – № 2 (78).

10 **Андрющенко, А. И., Николаев, Ю. Е.** Возможности повышения экономичности, надежности и экологичности систем теплофикации городов // Энергосбережение в городском хозяйстве, энергетике, промышленности: материалы Третьей Российской научно-технической конференции. – Ульяновск: УлГТУ, 2001. – С. 194–197.

11 **Андрющенко, А. И.** Возможности повышения эффективности систем централизованного теплоснабжения городов // Промышленная энергетика. – 2002. – № 6. – С. 15–18.

12 РД 34.20.519-97. Методические указания по испытанию водяных тепловых сетей на гидравлические потери.

13 РД 34 РК.20.519-05. Методические указания по испытаниям водяных тепловых сетей на гидравлические потери.

14 РД 153-34.1-20.526-00. Методические указания по испытанию водяных тепловых сетей на гидравлические потери без нарушения режимов эксплуатации.

REFERENCES

1 Teplosnabzhenie v Kazakhstane: problemy i puti resheniia [Heat supply in Kazakhstan: problems and solutions] / Informational agency Inform.kz. – Nur-Sultan. – 05.08.2022. – [Electronic resource]. – https://www.inform.kz/ru/teplosnabzhenie-v-kazahstane-problemy-i-puti-resheniya_a3963511.

2 **Terent'eva, A. S.** Analiz osnovnykh problem tsentralizovannogo teplosnabzheniia v Rossii na sovremennom etape [Analysis of the main problems of centralized heat supply in Russia at the present stage] // Nauchnye trudy INP RAN [Scientific Papers of the Energy Research Institute of the Russian Academy of Sciences], 2020. – Section «Energetics and Infrastructure». – P. 253–273. – <https://doi.org/10.47711/2076-318-2020-253-273>.

3 **Pashchenko, E. I.** Analiz prichin snizheniia resursa teplovykh setei [Analysis of the causes of thermal networks' service life reduction] // Novosti teplosnabzheniia [News of Heat Supply]. – 2002. – No. 12 (28). – P. 33–35.

4 Prichiny iznosa teplovykh setei [Causes of wear of heat networks] [Electronic resource] // Pavlodarenergo.kz. – Publication No. 16, November 2021.

– [Electronic resource]. – <https://pavlodarenergo.kz/ru/press-czentr/company-news/prichiny-iznosa-teplovykh-setej.html>.

5 Pravila tekhnicheskoi ekspluatatsii elektricheskikh stantsii i setei [Rules for the technical operation of power plants and networks]. Approved by the Order of the Minister of Energy of the Republic of Kazakhstan No. 247 dated March 30, 2015.

6 Tipovaia instruksiiia po tekhnicheskoi ekspluatatsii teplovykh setei sistem kommunal'nogo teplosnabzheniia [Standard instruction for the technical operation of heating networks of district heating systems]. Approved by the Order of the State Construction Committee of Russia No. 285 dated 13.12.2000.

7 Energoeffektivnost' kak zalog nadiozhnogo teplosnabzheniia potrebitelei [Energy efficiency as a key to reliable heat supply for consumers] // Sevkaenergo.kz. – Publication No. 18. – August 2020. – [Electronic resource]. – <https://www.sevkaenergo.kz/ru/press-center/novosti-kompanii/energoeffektivnost-kak-zalog-nadyozhnogo-teplosnabzheniya-potrebitelej.html>.

8 **Maniuk, V. I., Kaplinski, Ya. I., Khizh, E. B., Maniuk, A. I., P'in, V. K.** Naladka i ekspluatatsiia vodianykh teplovykh setei: spravochnik [Adjustment and operation of water heating networks: handbook]. – 3rd ed., revised and supplemented. – М.: Stroiizdat, 1988. – 432 p.

9 **Rotov, P. V.** Sposoby regulirovaniia teplovoi nagruzki sistem teplosnabzheniia. Perspektivy razvitiia [Methods of regulating the heat load of district heating systems. Prospects for development] // Novosti teplosnabzheniia [News of Heat Supply]. – 2007. – No. 2 (78).

10 **Andriushchenko, A. I., Nikolaev, Yu. E.** Vozmozhnosti povysheniia ekonomichnosti, nadezhnosti i ekologichnosti sistem teplofikatsii gorodov

[Possibilities of increasing the efficiency, reliability and environmental safety of district heating systems in cities] // Energoberezhnie v gorodskom khoziaistve, energetike, promyshlennosti: materialy Tret'ei Rossiiskoi nauchno-tekhnicheskoi konferentsii [Energy saving in municipal services, energy and industry: Proceedings of the Third Russian Scientific and Technical Conference]. – Ulyanovsk: Ulyanovsk State Technical University (UIGTU). – 2001. – P. 194–197.

11 **Andriushchenko, A. I.** Vozmozhnosti povysheniia effektivnosti sistem tsentralizovannogo teplosnabzheniia gorodov [Possibilities of increasing the efficiency of centralized district heating systems in cities] // Promyshlennaia energetika [Industrial Power Engineering], 2002. – No. 6. – P. 15–18.

12 RD 34.20.519-97. Metodicheskie ukazaniia po ispytaniu vodianykh teplovykh setei na gidravlicheskie poteri [Guidelines for testing water heating networks for hydraulic losses].

13 RD 34 РК.20.519-05. Metodicheskie ukazaniia po ispytaniam vodianykh teplovykh setei na gidravlicheskie poteri [Guidelines for testing water heating networks for hydraulic losses].

14 RD 153-34.1-20.526-00. Metodicheskie ukazaniia po ispytaniiu vodianykh teplovyykh setei na gidravlicheskie poteri bez narusheniia rezhimov ekspluatatsii [Guidelines for testing water heating networks for hydraulic losses without disrupting operating conditions].

Поступило в редакцию 29.07.25.

Поступило с исправлениями 13.10.25.

Принято в печать 05.12.25.

*М. Ш. Иманаев¹, А. А. Сафарбаков², С. И. Олейник³

¹«Павлодар жылу желілері» ЖШС, Қазақстан Республикасы, Павлодар қ.

²«Павлодартехэнерго» ЖШС, Қазақстан Республикасы, Павлодар қ.

³«ЭНЭКО» ЖШС, Қазақстан Республикасы, Павлодар қ.

29.07.25 ж. баспаға түсті.

13.10.25 ж. түзетулерімен түсті.

05.12.25 ж. басып шығаруға қабылданды.

ЖЫЛУ ЖЕЛІЛЕРІНІҢ ТОЗУЫНЫҢ АРТУЫ ЖАҒДАЙЫНДА ЖЫЛУМЕН ЖАБДЫҚТАУДЫҢ СЕНІМДІЛІГІН АРТТЫРУ

Бұл бапта құбырлардың тозуының жоғары дәрежесі жағдайында олардың жұмыс істеу сенімділігі мен қауіпсіздігін арттыру үшін жылу желілерінің гидравликалық режимін іс жүзінде түзету нәтижелері баяндалған. Бапта қабылданатын техникалық және ұйымдастырушылық шешімдердің себеп-салдарлық байланысы келтіріледі. Ұсынылатын техникалық шешімдердің жалпы сипаттамасы берілді. Мақаланың негізгі идеясы - бұл қалалық агломерацияның тұтынушыларына жеткізілетін жылудың мөлшерін реттеудің сапалық-сандық тәсілінен реттеудің аралас тәсіліне көшудің дәйекті қадамдарын жүзеге асыру қажеттілігі мен мүмкіндігі. Жобалық схемалардың ең аз өзгерістерімен реттеудің осы тәсілін іске асыру мүмкіндігі қарастырылады. Бұл ретте жылу желілерін пайдалану қауіпсіздігі және олардың бүкіл жылыту кезеңі ішіндегі жұмысының сенімділігі (тоқтаусыз жұмыс істеуі) экономикалық және энергетикалық тиімділікпен ажырамас байланыста қарастырылады.

Бапта оң тәжірибемен танысу мақсаты бар және жылу желілерінің, жобалау, конструкторлық және жөндеу ұйымдарының инженерлік-техникалық және басшылық құрамына арналған. Мақаланың материалы бакалавриаттың жоғары курс студенттері

мен магистранттардың «Жылу энергетикасы» (6B07105, 6B07111 және 7M07106) және «Жылу энергетикасы және орнықты даму» (6B07177) мамандықтары бойынша оқуы үшін пайдаланылуы мүмкін. Кілтті сөздер: жылу желілерін пайдалану, сандық реттеу, сапалық реттеу, жылумен жабдықтау, температура айырмашылығы.

*M. S. Imanaev¹, A. A. Safarbakov², S. I. Oleinik³

¹Pavlodar Heating Networks LLP, Republic of Kazakhstan, Pavlodar;

²Pavlodartekhenenergo LLP, Republic of Kazakhstan, Pavlodar.

³ENEKO LLP, Republic of Kazakhstan, Pavlodar.

Received 29.07.25.

Received in revised form 13.10.25.

Accepted for publication 05.12.25.

HEAT SUPPLY RELIABILITY IMPROVING IN CONDITIONS OF HEATING NETWORKS WEAR INCREASING

This article presents the results of the hydraulic mode practical adjustment for heating networks to improve the reliability and safety of their operation in conditions of pipeline high degree wear. The article provides a causal relationship between the technical and organizational decisions made. General description of proposed technical solutions is given. The main idea of the article is the need and possibility of carrying out sequential transition steps from a qualitative regulating method of the urban agglomeration consumers heat amount supplied to a combined – qualitative and quantitative method of regulation. The possibility of implementing this control method with minimal changes in design schemes is being considered. At the same time, the heating networks operation safety and the operation reliability during the entire heating period are considered in an inextricable connection with economic and energy efficiency.

The article is intended for positive experience familiarization for engineering and technical staff of heating networks, design, engineering and adjustment organizations. The material of the article can be used to study undergraduate students and undergraduates in the specialties «Heat Engineering» (6B07105, 6B07111 and 7M07106) and «Heat Engineering and Sustainable Development» (6B07177).

Keywords: heating networks operation, quantitative regulation, quality regulation, heat supply, temperature difference.

<https://doi.org/10.48081/GGBN2071>

**Ж. Б. Исабеков¹, Б. Б. Исабекова², *А. Б. Жантлесова³,
Л. Н. Есмаханова⁴, Ә. Б. Сағындық⁵**

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

³Казахский государственный университет имени С. Сейфуллина,
Республика Казахстан, г. Астана;

⁴Таразский университет имени М. Х. Дулати,
Республика Казахстан, г. Тараз.

¹ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-3980-1617>

²ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-5044-3211>

³ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-3730-0579>

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

⁵ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-0376-2150>

*e-mail: acbzh@mail.ru

ПОТЕРИ ЭЛЕКТРОЭНЕРГИИ В СЕТЯХ КАЗАХСТАНА: ПРИЧИНЫ, ПОСЛЕДСТВИЯ И ПУТИ ИХ СНИЖЕНИЯ

В современном мире проблема потерь электроэнергии приобретает всё большую значимость на фоне стремительного роста энергопотребления и внедрения современных технологий. Потери электроэнергии не только приводят к увеличению финансовых затрат, но и оказывают негативное влияние на устойчивость электросетей и экологическую обстановку. Наиболее остро эта проблема стоит в условиях перехода к цифровой экономике, где автоматизация технологических процессов и использование полупроводниковой электроники увеличивают нагрузку на энергосистему, создавая дополнительные потери из-за несинусоидальности напряжения. В данной статье рассматриваются основные виды потерь электроэнергии, причины их возникновения и последствия, а также приводится анализ современных методов их снижения. Особое внимание уделяется проблеме высших гармонических составляющих напряжения и их влиянию на электросети. Исследование направлено на поиск решений для оптимизации энергопотребления, что в дальнейшем способствует реализации государственной политики энергосбережения и повышения энергоэффективности. Сокращение

потерь электроэнергии способствует не только повышению стабильности и надёжности электросетей, но и играет важную роль в достижении целей устойчивого развития, а также позволяет минимизировать воздействие на окружающую среду, замедлить рост тарифов на электроэнергию и снизить нагрузку на конечных потребителей.

Ключевые слова: потери электроэнергии, технические потери, коммерческие потери, энергоэффективность, тарифы на электроэнергию, качество электроэнергии.

Введение

В современном мире проблема, связанная с потерями электроэнергии, является актуальной и привлекает всё больше внимания в связи с быстрым развитием технологий и увеличением энергопотребления.

Исследование различных типов потерь электроэнергии, их причин и последствий помогает выявить способы их снижения, что способствует повышению стабильности и эффективности системы электроснабжения. Это имеет важное значение для достижения целей устойчивого развития и уменьшения негативного воздействия на окружающую среду. Дальнейшее изучение темы анализа потерь электроэнергии позволит лучше понять её актуальность и многогранность, а также разработать более совершенные методы решения данной проблемы.

Материалы и методы

В таблице 1 представлены данные о потерях электроэнергии в пяти городах Республики Казахстан, находящихся в разных регионах по ежегодным отчетам региональных электросетевых компаний (РЭК) [1;2;3].

Таблица 1 – Технические потери (фактические потери) исходя из отчетов предоставленных РЭК данных регионов

Технические потери, %									
РЭК Год	2014	2015	2016	2017	2018	2019	2020	2021	2022
Кызылорда	15,7	14,62	15,41	15,2	15	14,8	14,7	14,7	14,65
Актобе	15,30	14,68	14,93	12,78	12,66	-	-	-	-
Астана	-	12,29	12	11,4	10,6	9,88	10,78	9,86	9,90
Петропавловск	10,17	9,7	9,1	8,4	8,36	7,83	7,72	7,21	-
Алматы	-	-	-	14,78	13,01	12,53	12,60	11,92	-

На основе информации, представленной в таблице 1, можно отметить положительную динамику снижения потерь электроэнергии за последние 9 лет во всех указанных регионах. Например, в городе Кызылорда, расположенном на юге Казахстана, за период с 2014 по 2022 год технические

потери снизились с 15,7 + % до 14,65 %. Согласно [4;5], в период с 2014 по 2019 год удалось значительно сократить коммерческие потери – с 4,82 % до 0,15 %. Однако информация о коммерческих потерях представлена исключительно в отчетах [5;6], связанных с деятельностью Кызылординской распределительной электросетевой компании (КРЭК). Наилучший результат по сокращению электрических потерь показало Петропавловское РЭК, значение которого равно 7,21 %. Астана РЭК за период с 2015 по 2022 год технические потери снизились на 2,39 %. Добиться таких результатов удалось благодаря ряду мероприятий, включая реконструкцию воздушных линий, модернизацию приборов учета электроэнергии и др.

Результаты и обсуждения

Несинусоидальность напряжения приводит к дополнительным потерям электроэнергии, ухудшению качества электроэнергии и снижению эффективности работы энергосистемы.

Несинусоидальность напряжения возникает из-за: нелинейных и несимметричных нагрузок и работы силовой электроники, а также приводит к следующим видам потерь: потери в линиях электропередач и потери в трансформаторах. Наибольшую долю среди всех составляющих потерь имеют потери в линиях электропередачи (порядка 83 %), которые складываются из нагрузочных потерь и потерь на корону. Далее следуют потери в трансформаторах, автотрансформаторах и реакторах (порядка 15 %), которые складываются из нагрузочных потерь и потерь холостого хода. Наименьшую долю имеет расход электроэнергии на собственные нужды подстанций (порядка 2 %).

Для оценки влияния гармоник на потери электроэнергии используется коэффициент искажения синусоидальности (КУ) напряжения (результаты расчета предоставлены в таблице 2), который определяется как:

$$KU = \frac{\sqrt{\sum_{n=2}^{\infty} U_n^2}}{U_1} 100\%$$

где U_n – напряжение n – гармоники, U_1 – напряжение основной гармоники.

Для анализа потерь электроэнергии были проведены измерения на подстанции 220 кВ «Атбасар», которая является частью Акмолинской межсистемной электрической сети [7;8]. Данная подстанция была выбрана для детального изучения.

Таблица 2 – Результаты испытаний электрической энергии по коэффициенту искажения синусоидальности кривой напряжения КУ (в процентах)

Измеряемая характеристика	Результат измерений	Нормативное значение
Фазное А	KU high	1,9
	KU max	2,3
Фазное В	KU high	2,2
	KU max	2,6
Фазное С	KU high	2,6
	KU max	3,2
Погрешность измерений	+/-5% (отн)	+/-10% (отн)

Для оценки влияния несимметрии на потери электроэнергии используется коэффициент несимметрии напряжений по обратной (K2U) последовательности (таблица 3) и нулевой (K0U) последовательности (таблица 4), которые определяются как:

$$K2U = \frac{U_{2m}}{U_{1n}} 100\%$$

$$K0U = \frac{U_{0m}}{U_{1n}} 100\%$$

где U_{2m} – напряжение обратной последовательности, U_{0m} – напряжение нулевой последовательности, U_{1n} – напряжение прямой последовательности.

Таблица 3 – Результаты испытаний электрической энергии по коэффициенту несимметрии напряжений по обратной последовательности K2U (в процентах)

Измеряемая характеристика	Результат измерений	Нормативное значение
K2U high	0,8	2,0
K2U max	1,3	4,0
Погрешность измерений	+/-0,2% (абс)	+/-0,3% (абс)

Таблица 4 – Результаты испытаний электрической энергии по коэффициенту несимметрии напряжений по нулевой последовательности K0U (в процентах)

Измеряемая характеристика	Результат измерений	Нормативное значение
K0U high	1,7	2,0
K0U max	1,9	4,0
Погрешность измерений	+/-0,2 % (абс)	+/-0,3 % (абс)

Представленные данные инструментального контроля были сняты при измерении основных технических параметров электроэнергии за

определенный период времени в соответствии с ГОСТ 13109 – 97 «Нормы качества электрической энергии в системах электроснабжения общего назначения».

Результаты испытаний электрической энергии, представленные в таблицах 2-4, показали, что измеренные характеристики находятся в пределах нормы. Эти данные сняты на подстанции 220 кВ «Атбасар» в Акмолинской межсистемной электрической сети. Если, например, $K2U = 2\%$, то потери в проводниках могут увеличиться на 5–10%, а в трансформаторах – на 3–5%.

Дополнительно на рисунках 1–3 показана динамика изменения параметров электрической энергии на подстанции 220 кВ «Атбасар».



Рисунок 1 – График изменения напряжения, кВ

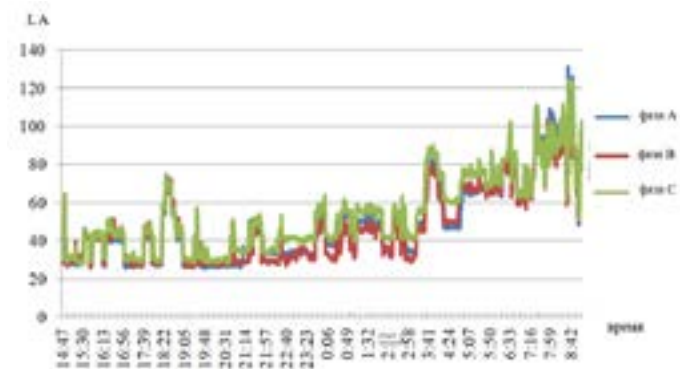


Рисунок 2 – График токовых нагрузок, А

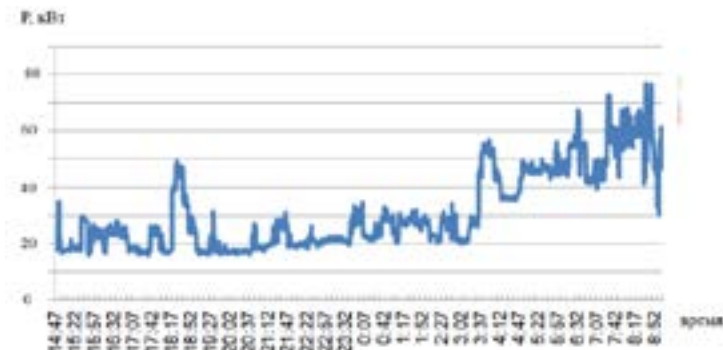


Рисунок 3 – График активной мощности, кВт

Несимметрия фаз и искажение формы напряжения минимальны, что подтверждает стабильность и надежность электроснабжения [9;10]. Измеренные параметры показывают сбалансированность фазных напряжений. Электроэнергия подается без значительных колебаний. Таким образом, результаты измерений, представленных на рисунках 1–3, подтверждают, что электрическая сеть работает в нормальном режиме, без серьезных отклонений от нормативных показателей.

Для минимизации негативного воздействия нелинейных потребителей электроэнергии предпринимаются такие меры, как использование фильтрокомпенсирующих устройств. Эти устройства, при условии их правильной настройки, эффективно фильтруют высшие гармоники напряжения, снижая их негативное влияние на сеть. Однако следует отметить, что подобные решения наиболее эффективны для крупных промышленных объектов, где нагрузка более однородна и централизована.

Вышесказанное, становится очевидным, что анализ уровня потерь электроэнергии, вызванных протеканием высших гармонических составляющих напряжения, и их количественная оценка являются важными шагами для снижения потерь в электрических сетях. Это, в свою очередь, способствует реализации государственной политики в области энергосбережения и повышения энергоэффективности. Кроме того, снижение сверхнормативных потерь электроэнергии позволит не только оптимизировать работу электросетей, но и замедлить рост тарифов на электроэнергию, что станет важным социально-экономическим преимуществом в современных условиях.

Мероприятия по снижению потерь можно разделить на три этапа. Первый этап заключается в подавлении источников гармонических искажений на стороне потребителей и генерирующего оборудования. Для этого необходимо

устанавливать специализированные фильтрующие устройства, такие как пассивные, активные или гибридные, которые компенсируют высшие гармоники, не позволяя им распространяться в сеть. Одновременно необходимо внедрять рациональные схемы электроснабжения, такие как использование трансформаторов со специальными схемами соединения обмоток для подавления гармоник, кратных трём, а также раздельное питание нелинейных и линейных нагрузок. Важным организационным условием является закрепление в договорах энергоснабжения индивидуальных нормативов по качеству электроэнергии для крупных потребителей, что стимулирует их к применению современного оборудования с низким уровнем генерации гармоник, например, частотных приводов с многоимпульсными схемами.

Второй вектор мероприятий сосредоточен на повышении устойчивости самой электрической сети к воздействию гармоник. Сетевые компании могут оптимизировать режимы работы, перераспределяя нагрузки между трансформаторами и линиями с учётом их различного сопротивления для токов разной частоты, что позволяет снизить общий уровень искажений. Не менее важна модернизация инфраструктуры: применение трансформаторов с сердечниками из аморфной стали, специально предназначенных для работы в условиях несинусоидальности, увеличение сечения кабелей на проблемных участках для снижения омических потерь и грамотный выбор параметров конденсаторных батарей, позволяющий избежать опасных резонансных явлений на частотах доминирующих гармоник.

Фундаментом для реализации всех технических мер должна стать развитая система мониторинга и экономического регулирования. Интеграция функций измерения показателей качества электроэнергии, включая коэффициент несинусоидальности, в современные интеллектуальные системы учёта (АСКУЭ) позволит в режиме реального времени идентифицировать основных «загрязнителей» сети и строить цифровые модели распространения гармоник. На основе этих данных становится возможным внедрение дифференцированной тарифной политики – предоставление скидок добросовестным потребителям и введение экономических санкций для нарушителей нормативов.

Выводы

Проведённый анализ показал, что потери электроэнергии представляют собой сложную проблему, обусловленную множеством факторов, включая несинусоидальность напряжения, состояние линий электропередачи и использование оборудования с нелинейными характеристиками. Основным шагом к снижению потерь является внедрение эффективных технологий, таких как фильтрокомпенсирующие устройства и системы автоматизированного

учёта электроэнергии (которые сейчас активно внедряются), а также пересмотр нормативных требований к качеству электроэнергии.

Сокращение потерь электроэнергии способствует не только повышению стабильности и надёжности электросетей, но и играет важную роль в достижении целей устойчивого развития, а также позволяет минимизировать воздействие на окружающую среду, замедлить рост тарифов на электроэнергию и снизить нагрузку на конечных потребителей.

Дальнейшие исследования в этой области необходимы для разработки более точных методов оценки потерь, связанных с высшими гармоническими составляющими напряжения, и их эффективного устранения. Это станет важным шагом на пути к созданию энергоэффективной и экологически чистой энергетики.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1 Отчет о деятельности АО «КРЭК» за 2017 г [Электронный ресурс]. – URL: – <https://www.krek.kz/news-doc/otchet3.pdf> (Дата обращения: 17.12.2024).

2 Ежегодный отчет о деятельности АО «КРЭК» по предоставлению услуг по передаче электрической энергии за 2018 год. [Электронный ресурс]. – URL: – https://www.krek.kz/news-doc/krek_otchet_2018.pdf (Дата обращения: 17.12.2024).

3 Отчет о деятельности АО «КРЭК» за 1-полугодие 2021 г [Электронный ресурс]. – URL: – https://www.krek.kz/news-doc/TS_IP_2021.pdf (Дата обращения: 17.12.2024).

4 Отчет о деятельности АО «КРЭК» за 1-полугодие 2022 г [Электронный ресурс]. – URL: – https://www.krek.kz/news-doc/TS_2022_1.pdf (Дата обращения: 17.12.2024).

5 Отчет о деятельности АО «Астана – Региональная Электросетевая Компания» за 2016г [Электронный ресурс]. – URL: – https://www.astrec.kz/uploads/files/otchet_o_deyatelnosti.pdf (Дата обращения: 17.12.2024).

6 Отчёт об исполнении тарифной сметы АО «Астана-РЭК» за 2019 год [Электронный ресурс]. – URL: – https://astrec.kz/uploads/files/Отчет_перед_потребителями_19r.pdf (Дата обращения: 17.12.2024).

7 Akimzhanov, T., Sarsikeyev, Y., Zhantlessova, A., Mekhtiyev, A., Neshina, Y. Identifying The Influence Of The System And Mode Characteristics On The Power Loss Mode Based In 110 kV Power Grids // Eastern-European Journal of Enterprise Technologies. – 2023. – № 6(8–126). – P. 6–14.

8 Zhantlessova, A., Zhumazhanov, S., Akimzhanov, T., Mekhtiyev, A. D., Neshina, Y. G. Instrumental Research on the Voltage Harmonic Distortion

Coefficient in the Modern 110 kV Urban Electric Network // International Journal on Energy Conversion. – 2023. – № 11(2). – P. 56–63.

9 DeSantis, D., James B. D., Houchins, C., Saur G., Lyubovsky, M. Cost of long-distance energy transmission by different carriers. iScience. [Electronic resource]. – URL: – <https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pmc/articles/PMC8661478/> (Accessed 24.03.2023).

10 7 major challenges of a power grid and their solutions [Electronic resource]. – URL: <https://ee-ip.org/en/article/7-major-challenges-of-a-power-grid-and-their-solutions-1812> (Accessed 24.03.2023).

REFERENCES

1 Otchet o dejatel'nosti AO «KRJeK» za 2017 g [Report on the activities of JSC «KRAK» for 2017] [Electronic resource]. – URL: – <https://www.krek.kz/news-doc/otchet3.pdf> (Accessed: 17.12.2024).

2 Ezhgodnyj otchet o dejatel'nosti AO «KRJeK» po predostavleniju uslug po peredache jelektricheskoy jenergii za 2018 god. [Annual report on the activities of JSC «KRAK» for the provision of electric power transmission services for 2018.] [Electronic resource]. – URL: – https://www.krek.kz/news-doc/krek_otchet_2018.pdf (Accessed: 17.12.2024).

3 Otchet o dejatel'nosti AO «KRJeK» za 1-polugodie 2021 g [Report on the activities of JSC «KRAK» for the 1st half of 2021] [Electronic resource]. – URL: – https://www.krek.kz/news-doc/TS_IP_2021.pdf (Accessed: 17.12.2024).

4 Otchet o dejatel'nosti AO «KRJeK» za 1-polugodie 2022 g. [Report on the activities of JSC «KRAK» for the 1st half of 2022] [Electronic resource]. – URL: – https://www.krek.kz/news-doc/TS_2022_1.pdf (Accessed: 17.12.2024).

5 Otchet o dejatel'nosti AO «Astana – Regional'naja Jelektrosetevaja Kompanija» za 2016g. [Report on the activities of Astana Regional Electric Grid Company JSC for 2016]. [Electronic resource]. – URL: – https://www.astrec.kz/uploads/files/otchet_o_deyatelnosti.pdf (Accessed: 17.12.2024).

6 Otchjot ob ispolnenii tarifnoj smety AO «Astana-RJeK» za 2019 god. [Report on the execution of the tariff estimates of Astana-REC JSC for 2019] [Electronic resource]. – URL: – https://astrec.kz/uploads/files/Otchet_perebotrebiteljami_19g.pdf (Accessed: 17.12.2024).

7 Akimzhanov, T., Sarsikejev, Y., Zhantlessova, A., Mekhtiyev, A., Neshina, Y. Identifying The Influence Of The System And Mode Characteristics On The Power Loss Mode Based In 110 kV Power Grids // Eastern-European Journal of Enterprise Technologies. – 2023. – № 6(8–126). – P. 6–14.

8 Zhantlessova, A., Zhumazhanov, S., Akimzhanov, T., Mekhtiyev, A. D., Neshina, Y. G. Instrumental Research on the Voltage Harmonic Distortion

Coefficient in the Modern 110 kV Urban Electric Network // International Journal on Energy Conversion. – 2023. – № 11(2). – P. 56–63.

9 DeSantis, D., James B. D., Houchins, C., Saur G., Lyubovsky, M. Cost of long-distance energy transmission by different carriers. iScience. [Electronic resource]. – URL: – <https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pmc/articles/PMC8661478/> (Accessed 24.03.2023).

10 7 major challenges of a power grid and their solutions [Electronic resource]. – URL: – <https://ee-ip.org/en/article/7-major-challenges-of-a-power-grid-and-their-solutions-1812> (Accessed 24.03.2023).

Поступило в редакцию 27.07.25.

Поступило с исправлениями 03.11.25.

Принято в печать 05.12.25.

Ж. Б. Исабеков¹, Б. Б. Исабекова², *А. Б. Жантлесова³,

Л. Н. Есмаханова⁴, Ә. Б. Сағындық⁵

^{1,2,5}Торайғыров университеті, Қазақстан Республикасы, Павлодар қ.

³С. Сейфуллин атындағы Қазақ агротехникалық зерттеу университеті, Қазақстан Республикасы, Астана қ.;

⁴М. Х. Дулати атындағы Тараз университеті,

Қазақстан Республикасы, Тараз қ.

27.07.25 ж. баспаға түсті.

03.11.25 ж. түзетулерімен түсті.

05.12.25 ж. басып шығаруға қабылданды.

ҚАЗАҚСТАН ЖЕЛІЛЕРІНДЕГІ ЭЛЕКТР ЭНЕРГИЯСЫНЫҢ ЖОҒАЛУЫ: СЕБЕПТЕРІ, САЛДАРЫ ЖӘНЕ ОЛАРДЫ ТӨМЕНДЕТУ ЖОЛДАРЫ

Заманауи әлемде энергия тұтынудың қарқынды өсуі және заманауи технологияларды енгізу аясында электр энергиясын азаю проблемасы барған сайын маңызды болып отыр. Электр энергиясының азаюы қаржылық шығындардың өсуіне әкеліп қана қоймай, электр желілерінің тұрақтылығына және экологиялық жағдайға кері әсерін тигізеді. Технологиялық процестерді автоматтандыру және жартылай өткізгішті электрониканы пайдалану электр жүйесіне жүктемені арттырып, синусоидалы емес кернеудің әсерінен қосымша шығындарды тудыратын цифрлық экономикаға қошу жағдайында бұл мәселе ең өткір болып табылады.

Бұл мақалада электр энергиясын асаудың негізгі түрлері, олардың себептері мен салдары қарастырылады, сонымен қатар оларды жоюдың заманауи әдістеріне талдау жасалады. Кернеудің жоғары гармоникалық құрамдас бөліктері және олардың электр желілеріне әсері мәселесіне ерекше назар аударылады. Зерттеу энергияны үнемдеу және энергия тиімділігін арттыру жөніндегі мемлекеттік саясатты одан әрі іске асыруға ықпал ететін энергия тұтынуды оңтайландыру шешімдерін табуға бағытталған. Электр энергиясының жоғалуын азайту электр желілерінің тұрақтылығы мен сенімділігін арттыруға ғана емес, сонымен қатар тұрақты даму мақсаттарына қол жеткізуде маңызды рөл атқарады, сонымен қатар қоршаған ортаға әсерді азайтуға, электр энергиясы тарифтерінің осуін бәсеңдетуге және соңғы тұтынушыларға жүктемені азайтуға мүмкіндік береді.

Кілтті сөздер: электр энергиясының жоғалуы, техникалық шығындар, коммерциялық шығындар, энергия тиімділігі, электр энергиясының тарифтері, электр энергиясының сапасы.

Zh. B. Issabekov¹, B. B. Issabekov², *A. B. Zhantlessova³,

L. Yesmakhanova⁴, A. B. Sagyndyk⁵

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

³Kazakh State University named after S. Seifullin,

Republic of Kazakhstan, Astana;

⁴M. Kh. Dulaty Taraz University, Republic of Kazakhstan, Taraz.

Received 27.07.25.

Received in revised form 03.11.25.

Accepted for publication 05.12.25.

ANALYSIS OF ELECTRICITY COSTS IN ELECTRIC NETWORKS OF KAZAKHSTAN: CAUSES, CONSEQUENCES AND WAYS TO REDUCE THEM

In the modern world, the problem of electricity losses is becoming increasingly important against the rapid growth of energy consumption and the introduction of modern technologies. Electricity losses not only lead to increased financial costs, but also have a negative impact on the stability of power grids and the environmental situation. This problem is most acute in the context of the transition to a digital economy, where automation of technological processes and the use of semiconductor electronics increase the load on the power system, creating additional losses due to non-sinusoidal voltage. This article discusses the main types of electricity

losses, their causes and consequences, and provides an analysis of modern methods for reducing them. Special attention is paid to the problem of higher harmonic voltage components and their effect on power grids. The research is aimed at finding solutions to optimize energy consumption, which further contributes to the implementation of the state policy of energy conservation and energy efficiency improvement. Reducing electricity losses contributes not only to improving the stability and reliability of power grids, but also plays an important role in achieving sustainable development goals, as well as minimizing environmental impacts, slowing down the growth of electricity tariffs and reducing the burden on end users.

Keywords: electricity losses, technical losses, commercial losses, energy efficiency, electricity tariffs, electricity quality.

<https://doi.org/10.48081/PIAZ8524>

***Д. Д. Исабеков¹, Н. Ш. Жуматаев², В. П. Марковский³,
А. Тозлу⁴, С. К. Жумажанов⁵**

^{1,2,3}Торайғыров университеті, Қазақстан Республикасы, Павлодар қ.;

⁴Байбурт университеті, Түркия, Байбурт қ.;

⁵Л. Н. Гумилев атындағы Еуразия ұлттық университеті,
Қазақстан Республикасы, Астана қ.

¹ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-6673-5646>

²ORCID: <https://orcid.org/0009-0002-9464-9355>

³ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-8519-7679>

⁴ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-2610-5279>

⁵ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-0400-5488>

*e-mail: Dauren_pvl2012@mail.ru

ЭЛЕКТР ҚОНДЫРҒЫЛАРЫНЫҢ АЛЬТЕРНАТИВТІК РЕСУРС ҮНЕМДЕЙТІН ДОҒАЛЫҚ ҚОРҒАНЫСЫ

Мақалада авторлар энергетикалық және ресурстарды үнемдейтін доғалық релелік қорғаудың орналасу және әрекет ету принципін ұсынады, оның мақсаты 10 кВ кернеуі бар жиынтық комплекттік құрылғыларының (КТҚ) барлық ұяшықтарын электр доғасының бірге жүретін ішкі қысқа тұйықталудан қорғау болып табылады. Жоғарыда айтылғандардың барлығы релелік қорғанысты орындауда жаңа тәсілді ұсынады деп сеніммен айтуға болады. Бұл қорғаныстың әмбебаптығы оның әрекеті КТҚ ұяшығының әртүрлі бөліктеріндегі жарықтандырудың өзгеруіне жауап беретін фотодиодтар негізінде доғалық қысқа тұйықталудан жылдам әрекет ететін қорғауды жүзеге асырудан тұрады. Нәтижесі-ұсынылған қорғанысты пайдалану ұяшықтың өзі де, оған қосылған электр қондырғылары да релелік қорғаныстың сенімділігін арттырады. Релелік қорғаныстың сенімділігін арттырумен қатар, металл өзектері бар металл сыйымды, қымбат және салмақ өлшемдері бойынша көлемді ток трансформаторларын пайдаланбау да маңызды фактор болып табылады, бұл релелік қорғаудың өзекті мәселесіне-энергия мен ресурстарды үнемдеуге жауап береді, бұл болашақта электр энергетикасында одан да маңызды приоритетарға ие болады. Ұсынылған доғалық қорғаныс ішкі және

сыртқы қондырғылардың КТҚ ұяшықтарының барлық серияларында қолданылады. Бұл қорғаныстың барлық құрылымдық элементтері металл конструкцияларын қолданбай жасалады, атап айтқанда «PLA» сияқты жеңіл және берік пластиктен 3D принтерде басылған.

Кілтті сөздер: фотодиод, реле, жарық ағыны, альтернативтік релелік қорғаныс, ресурс үнемдеу.

Кіріспе

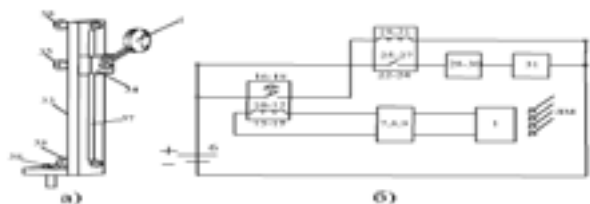
Электр энергетикасындағы ресурс үнемдеу мәселесі қазір де өзекті болып қала отырып, үлкен энергетикалық жүйелер-CIGRE жөніндегі халықаралық кеңестерде бірнеше рет көтерілді [1];[2];[3];[4]. Осыған байланысты техникалық параметрлері бойынша оларға кем түспейтін альтернативтік құрылғылар мен конструкцияларды іздестіру жөніндегі жұмыстар, сонымен бір мезгілде пайдаланылатын материалдардың ресурсты үнемдеу әсері барған сайын өзекті бола түсуде. Сонымен басқа элементтік базада орындалған қорғаудың жаңа конструкцияларын әзірлеу қажет. Мысалы, альтернативтік ретінде электромагниттік өрістердің әсеріне негізделген әртүрлі магнитті сезімтал элементтерге құрылған бірқатар қорғаныстар бар, мысалы оның ішінде, магнитотранзисторлар, магнитодиодтар, магниторезисторлар [5], Холл датчиктері [6], Роговский катушкалары [7] және геркондар [8]; [9]. Өткен ғасырдың екінші жартысында басталған металл өзектері бар металды көп қажет ететін ток трансформаторларын (ТТ) қолданбай, микропроцессорлық құрылғылардың кеңінен енгізілуіне қарамастан, әртүрлі электр қондырғыларына арналған энергияны және ресурстарды үнемдейтін релелік қорғаныс құрылғыларын құру, бүгінгі күнге дейін өзекті болып қала береді. Металл өзектері бар ТТ жоқ осындай құрылғыларды құрудың перспективалы жолдарының бірі ретінде доғалық қорғауды жүзеге асыру үшін фотодиодтарды пайдалану болып табылады [10];[11]. Осы ғасырдың басынан бастап әртүрлі элементтік базада бірқатар әзірленген релелік қорғаныс құрылғылары бар, соның ішінде олардың жұмыс істеуі мен қызмет көрсетуінің қарапайымдылығына ие КТҚ жасушаларының ішіне бекіту үшін. Бұл тарату құрылғылары Қазақстанның да, шетелдің де электр энергетикасында кең таралуына байланысты таңдалды. Бұл жұмыста К-63 сериясының мысалында және ұяшыққа қосылған әртүрлі электр қондырғыларында КТҚ ұяшығының ішінде доғалық қысқа тұйықталудан жылдам әрекет ететін қорғауды жүзеге асыру бойынша жаңа конструктивті шешім (құрылғы түрінде ұсынылған) ұсынылады. Ұсынылған жұмыста қорғаныстың элементтерін орнату Электр Қондырғылары Құрылғыларының ережелеріне (ЭҚЕ) сәйкес болып орындалған [12].

Материалдар мен әдістері

Зерттеу нәтижесінде әртүрлі көздерді ресурс үнемдеу әсері бар және КТҚ ұяшықтары мен оларға қосылған электр қондырғыларының әртүрлі сериялары үшін қолданылатын, кернеуі 10 кВ дәстүрлі доғалық қорғауларға жаңа альтернативтік қорғаныс құрылғысын ұсынуға мүмкіндік берді.

Нәтижелер және талқылау

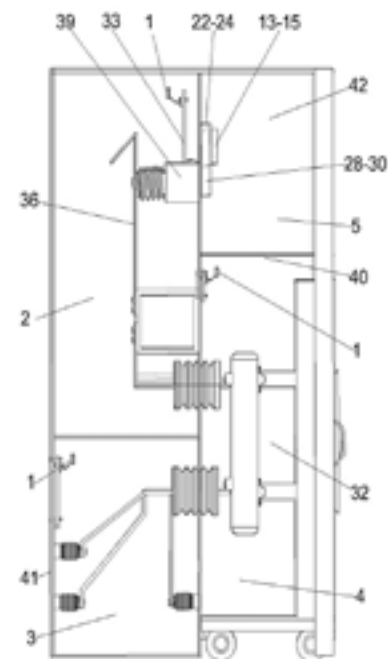
Құрылғы түрінде ұсынылған альтернативтік доғалық қорғанысы (1 және 2 сурет), өзінің құрамында фотодиодтары 1, кабельдік бөлімде 2, құрама шиналар бөлімінде 3 және ажыратқыш бөлімінде 4 комплектық тарату құрылғысының (КТҚ) ұяшығының 5 орналастырылған. Фотодиодтардың 1 бірінші шығысы тұрақты ток көзіне 6 қосылған, ал екінші шығысы сигнал күшейткіштерінің 7,8,9 кірісіне қосылған (сурет 1а). 7–9 сигнал күшейткіштерінің шығыстарға бірінші орамасының 10-12 шығысы уақыт релесінің 13–15 қосылған, ал орамасының 10-12 екінші шығысы 13–15 уақыт релесі тұрақты ток көзінің 6 «минус» полюсіне қосылған. 6 тұрақты ток көзінің «плюс» полюсіне қосылған 13–15 уақыт релесінің 16-18 уақыты бар тұйықталу контактілерге 19–21 орамаларының 22-24 аралық реленің бірінші шығыстары қосылған (сурет 1б). 19–21 орамаларының 22–24 релесінің екінші шығысы тұрақты жедел ток көзінің 6 «минус» полюсіне қосылған. Тұрақты жедел ток көзінің 6 «плюс» полюсіне қосылған 22–24 аралық реленің 25–27 тұйықталу контактілеріне 28–30 көрсеткіш реленің кірісі қосылған.



1-сурет – Альтернативтік доғалық қорғаныс құрылғысы:
а) фотодиод; б) құрылғының структурлық схемасы

28–30 көрсеткіш реленің шығысына 31 ажырату катушқасының кірісі электр қондырғысының 32 ажыратқышына қосылған. 1 фотодиодтар 33 планкаға 34 пластинаның көмегімен 35 бұрандалы-гайка қосылымы арқылы 36 ток өткізгіш шинаға қарама-қарсы, 37 ойықтар бойымен қозғалу мүмкіндігімен бекітілген. 33 планка 2,3,4 бөлімдерде 39 металл шығыңқы жерге, сондай-ақ 40 бөлімге және 5 ұяшықтың 41 артқы қабырғасына 38 бұранданың көмегімен бекітіледі.

13–15 уақыт релесінің 10–12 және 19-21 орамаларының 22–24 аралық релелерінің екінші шығыстары 6 тұрақты жедел ток көзінің «минус» полюсіне қосылған. Уақыт релесі 13–15, аралық 22–24 және көрсеткіш 28–30 релелер 5 ұяшықтың 42 релелік шкафта орналасқан (сурет 2). Альтернативтік қорғаныстың мақсаты 5 ұяшық бөлімдеріндегі жарықтың өзгеруіне жауап беретін фотодиодтарға негізделген доғалық қысқа тұйықталудан қорғау.



2-сурет – Доғалық қорғаныс құрылғысының
КТҚ ұяшығының ішінде орналасуы

Альтернативтік доғалық қорғаныс келесідей жұмыс істейді. 5 ұяшықтың 2,3,4 бөлімдерінің 36 ток өткізгіш шиналары бойынша нормалдық жұмыс режимінде оның жұмыс мәнінен аспайтын ток өтеді, сәйкесінше 5 ұяшықтың бөліктерінде жарық болмайды, содан кейін сәйкесінше 1 фотодиодқа ешқандай жарық әсер етпейді және осыған байланысты доғалық қорғаныс іске қосылмайды жұмыс (сурет 2). 2,3,4 бөлімдерінде доға арқылы қысқа тұйықталу пайда болған кезде жарық өзгереді және

бұл өзгеріске 1 фотодиодтардың біреуі іске қосылады (сурет 2). Фотодиод 1-ге жарықтандырудың әсері «ЛМ» көрсеткілерімен көрсетілген. Осыдан кейін 1 фотодиодтан сигнал 7–9 сигнал күшейткішінің кірісіне түседі, ал одан күшейтілген сигнал 13–15 уақыт релесінің 10–12 орамасының бірінші шығысы келеді (сурет 1,2). 13–15 уақыт релесі 0,02 с-қа тең уақыт ысырмасын санау арқылы іске қосылады және 16–18 тұйықталу уақытының ысырмасымен контактісін жабады, ол 22–24 аралық реленің 19–21 орамасының бірінші шығысына сигнал береді. 22–24 аралық реле 25–27 тұйықталу контактісімен 28–30 арқылы көрсеткіш релеге іске қосылады және 32 ажыратқыштың 31 ажырату қатұшқасына сигнал береді (сурет 1). Осыдан кейін 5 ұяшық және оған қосылған қорғалған электр қондырғысы ажыратылады. Қажет болған жағдайда доғалық қорғаныс қысқа тұйықталу тогын бақылау үшін (максималды ток қорғанысын іске қосу) және кернеуді төмендетуді–минималды кернеуді қорғауды іске қосумен толықтырылады.

Қорытынды

Қарастырылған қорғаныста оның интернет қосылымына байланысы жоқ екендігі негіз болып табылады және бұл өз кезегінде релелік қорғаныстағы киберқауіпсіздіктің өзекті мәселелеріне жауап береді, мысалы, кибершабуылдарға ұшырамау, осылайша релелік қорғаныстың осалдығын төмендетеді. Маңызды факт – жоғары құны мен салмақ өлшемдері бар металл өзектері бар ток трансформаторлары мен релелерін пайдаланбау, бұл энергетиканың өзекті мәселесіне жауап береді–материалдарды ресурстарды үнемдеу, бұл қорғауды кез-келген сериядағы КТҚ ұяшығының өзін де, оған қосылған электр қондырғыларын да номиналды кернеудің ар түрлі классы мен альтернативтік доғалық қорғауды жүзеге асыру үшін пайдалануға мүмкіндік береді.

ПАЙДАЛАНЫЛҒАН ДЕРЕКТЕР ТІЗІМІ

1 Гуревич, В. И. Электрические реле. Устройство, принцип действия и применение. Настольная книга электротехника. Серия: «Компоненты и Технологии». – М. : изд. СОЛОН-Пресс, 2011. – 688 с. – [Электронды ресурс]. – [Elektrich_rele_Ustr_princip_deist_i_primen_2011.pdf](#)

2 Трансформаторы измерительные. Часть 2. Технические условия на трансформаторы тока. – М. : изд. «Стандартинформ», 2018. – 46 с. [Электронды ресурс]. – https://www.elec.ru/viewer?url=files/2019/03/21/pnst_283-2018.pdf

3 Regalii, Suassuna de Andrade Ferreira, Jalberth, Fernandes de Araujo, Filipe, L. M. Andrade, Edson, G. Costa, Francisco, C. F. Guerra. Influence of electromagnetic forces in the gaps of a protective CT. IET «Science, Measurement

& Technology», – 2018. Vol. 12. – Issue 7. – P. 872–877. – <https://doi.org/10.1049/iet-smt.2017.042>

4 Issabekov, D., Issenov, S. Alternative Resource-Saving Current Protections for Electric Motors. Proceedings – 2024 International Russian Smart Industry Conference «SmartIndustryCon 2024» – P. 19–24. – 2024. – <https://doi.org/10.1109/SmartIndustryCon61328.2024.10515681>

5 Yafeng, Chen, Qi, Huang, Arsalan, Habib Khawaja. Interference-rejecting current measurement method with tunnel magnetoresistive magnetic sensor array. IET «Science, Measurement & Technology», – 2018. Vol. 12. – Issue 6. – P. 733 – 738. – <https://doi.org/10.1049/iet-smt.2017.0433>

6 Crescentini, M. et al. Hall-effect current sensors: principles of operation and implementation techniques. IEEE «Sensors» journal, – 2022. – Vol. 22. – №. 11. June 1. – P.10137–10151. – [Электронды ресурс]. – <https://ieeexplore.ieee.org/stamp/stamp.jsp?arnumber=9568879>

7 Ayob, Nazmy Nanyan, Muzamir, Isa, Haziha, Abdul Hamid, Mohamad, Nur Khairul Hafizi Rohani, Baharuddin, Ismail. A Review / The Rogowski Coil Sensor in High Current Application. IOP Conf. Series: «Materials Science and Engineering», – 2018. №318. – P. 1–10. – [Электронды ресурс]. – <https://iopscience.iop.org/article/10.1088/1757-899X/318/1/012054/pdf>

8 Gurevich, V. I. Device of Protection of Relay Protection: Scientific Journal of «Electrical Engineering», – June 2013.– Vol. 3 – Iss. 3. – P. 52–57. – [Электронды ресурс]. – https://gurevich-publications.com/articles_pdf/device_protection_rel_prot_engl.pdf

9 Issabekov, D. D. Resource-saving protections of power transformers against internal faults. «E3S Web of Conferences ICECAE». – Vol. 434. – № 01041, – P. 35–39. – 2023. – <https://doi.org/10.1051/e3sconf/202343401041>

10 Патент № 2020688 Российской Федерации. Устройство защиты комплектных распределительных устройств от дуговых коротких замыканий / Нагай В. И., Котлов М. М. ; опубл. 30.09.1994.

11 Нагай, В. И. Быстродействующие дуговые защиты КРУ. Современное состояние и пути совершенствования // Новости электротехники – 2003. – № 5. – С. 48–51.

12 Приказ Министра энергетики Республики Казахстан. Правила устройства электроустановок Республики Казахстан: утв. 20 марта 2015 года. – №230 // adilet.zan.kz. [Электронды ресурс]. – <https://adilet.zan.kz/rus/docs/V1500010851>

REFERENCES

1 **Gurevich, V. I.** Jelektricheskie rele. Ustrojstvo, princip dejstvija i primenenie. Nastol'naja kniga jelektrotehnika. Serija: «Komponenty i Tehnologii». [Electric relays. Device, principle of operation and application]. M. : izd. SOLON-Press. – 2011.–688 p. – [Electronic resource]. – [Elektrich_rele_Ustr_princip_deist_i_primen_2011.pdf](#)

2 Transformatory izmeritel'nye. Chast' 2. Tehnicheskie uslovija na transformatory toka. [Measuring transformers]. – M. : izd. «Standartinform». 2018.– 46 p. – [Electronic resource]. – https://www.elec.ru/viewer?url=files/2019/03/21/pnst_283-2018.pdf

3 **Regelii, Suassuna de Andrade Ferreira, Jalberth, Fernandes de Araujo, Filipe, L. M. Andrade, Edson, G. Costa, Francisco, C. F. Guerra.** Influence of electromagnetic forces in the gaps of a protective CT. IET «Science, Measurement & Technology», – 2018. – Vol. 12. – Issue 7. – P. 872–877. – <https://doi.org/10.1049/iet-smt.2017.042>

4 **Issabekov, D., Issenov, S.** Alternative Resource-Saving Current Protections for Electric Motors. Proceedings – 2024 International Russian Smart Industry Conference «SmartIndustryCon 2024». – 2024. – P. 19–24. – <https://doi.org/10.1109/SmartIndustryCon61328.2024.10515681>

5 **Yafeng, Chen, Qi, Huang, Arsalan, Habib Khawaja.** Interference-rejecting current measurement method with tunnel magnetoresistive magnetic sensor array. IET «Science, Measurement & Technology». – 2018. – Vol. 12. – Issue 6. – P. 733 – 738. – <https://doi.org/10.1049/iet-smt.2017.0433>

6 **Crescentini, M. et al.** Hall-effect current sensors: principles of operation and implementation techniques. IEEE «Sensors» journal. – 2022. june 1.– Vol. 22. – №. 11. – P.10137–10151. – [Electronic resource]. – <https://ieeexplore.ieee.org/stamp/stamp.jsp?arnumber=9568879>

7 **Ayob, Nazmy Nanyan, Muzamir, Isa, Haziah, Abdul Hamid, Mohamad, Nur Khairul Hafizi Rohani, Baharuddin, Ismail.** A Review / The Rogowski Coil Sensor in High Current Application. IOP Conf. Series: «Materials Science and Engineering». – №318. – P. 1–10. – 2018. – [Electronic resource]. – <https://iopscience.iop.org/article/10.1088/1757-899X/318/1/012054/pdf>

8 **Gurevich, V. I.** Device of Protection of Relay Protection: Scientific Journal of «Electrical Engineering», – June 2013. – Vol. 3 – Iss. 3. – P. 52–57. – [Electronic resource]. – https://gurevich-publications.com/articles_pdf/device_protection_rel_prot_engl.pdf

9 **Issabekov, D. D.** Resource-saving protections of power transformers against internal faults. «E3S Web of Conferences ICECAE». Vol. 434, № 01041. – P. 35–39. – 2023. – <https://doi.org/10.1051/e3sconf/202343401041>

10 Patent № 2020688 Rossijskoj Federacii. Ustrojstvo zashhity` komplektny`x raspredelitel`ny`x ustrojstv ot dugovy`x korotkix замы`kanij [Protection device for complete switchgear against arc short circuits]. – Nagaj V. I., Kotlov M. M. ; opubl. 30.09.1994.

11 **Nagaj, V. I.** By`strodejstvuyushhie dugovy`e zashhity` KRU. Sovremennoe sostoyanie i puti sovershenstvovaniya [High-speed arc protection of complete switchgear. Current state and ways of improvement], [Text]: Novosti e`lektrotexniki – 2003. – № 5. – P. 48–51.

12 Prikaz Ministra jenergetiki Respubliki Kazahstan. Pravila ustrojstva jelektroustanovok Respubliki Kazahstan [Rules for Electrical Installations of the Republic of Kazakhstan], [Text]: utv. 20 marta 2015 goda, – №230 // – [Electronic resource]. – adilet.zan.kz. <https://adilet.zan.kz/rus/docs/V1500010851>

20.09.25 ж. баспаға түсті.

05.11.25 ж. түзетулерімен түсті.

05.12.25 ж. басып шығаруға қабылданды.

*Д. Д. Исабеков¹, Н. Ш. Жуматаев², В. П. Марковский³,

А. Тозлу⁴, С. К. Жумажанов⁵

^{1,2,3}Торайғыров университет, Республика Казахстан, г. Павлодар;

⁴Университет Байбурта, Турция, г. Байбурт;

⁵Евразийский национальный университет имени Л. Н. Гумилева, Республика Казахстан, г. Астана.

Поступило в редакцию 20.09.25.

Поступило с исправлениями 05.11.25.

Принято в печать 05.12.25.

АЛЬТЕРНАТИВНАЯ РЕСУРСОБЕРЕГАЮЩАЯ ДУГОВАЯ ЗАЩИТА ЭЛЕКТРОУСТАНОВОК

В статье авторами предложен принцип компоновки и действия энерго и ресурсосберегающей дуговой релейной защиты, назначением которой является защита всех отсеков ячеек комплектных распределительных устройств (КРУ), напряжением 10 кВ. от внутренних коротких замыканий, сопровождаемых электрической дугой. С уверенностью можно сказать, что все выше представленное в совокупности предлагает новый подход в выполнении релейной защиты. Универсальностью данной защиты является то, что её действие заключается в реализации быстродействующей защиты от дуговых

коротких замыканий на основе фотодиодов, реагирующих на изменение освещенности внутри различных отсеков ячейки КРУ. Результатом является то, что использование представленной защиты повышает надежность релейной защиты, как самой ячейки, так и электроустановок, подключенных к ней. Кроме повышения надежности релейной защиты, немаловажным фактором также является отсутствие использования металлоёмких, дорогих по стоимости и громоздких по весогабаритным параметрам трансформаторов тока с металлическими сердечниками, что отвечает актуальному вопросу релейной защиты–энерго и ресурсосбережению, который в будущем будет иметь ещё более значимые приоритеты в электроэнергетике. Представленная дуговая защита применима во всех сериях ячеек КРУ внутренней и наружной установок. Все конструктивные элементы данной защиты выполнены без применения каких–либо металлических конструкций, а именно из облегчённого и прочного пластика, типа «PLA», распечатанных на 3D принтере.

Ключевые слова: фотодиод, реле, световой поток, альтернативная релейная защита, ресурсосбережение.

**D. D. Issabekov¹, N. Sh. Zhumataev², V. P. Markovskiy³,*

A. Tozlu⁴, S. K. Zhumazhanov⁵

^{1,2,3}Toraighyrov University, Republic of Kazakhstan, Pavlodar;

⁴Bayburt University, Turkey, Bayburt;

⁵L. N. Gumilyov Eurasian National University, Republic of Kazakhstan, Astana.

Received 20.09.25.

Received in revised form 05.11.25.

Accepted for publication 05.12.25.

ALTERNATIVE RESOURCE-SAVING ARC PROTECTION OF ELECTRICAL INSTALLATIONS

In the article, the authors propose the principle of the layout and operation of energy- and resource-saving arc relay protection, the purpose of which is to protect all cell compartments of complete switchgears with a voltage of 10 kV. from internal short circuits accompanied by an electric arc. It is safe to say that all of the above presented in the material offers a new approach to relay protection. The versatility of this protection is that its effect is to implement high-speed protection against arc short circuits based on photodiodes that respond to changes in illumination inside

various compartments of the control panel cell. The result is that the use of the presented protection increases the reliability of relay protection, both of the cell itself and of the electrical installations connected to it. In addition to improving the reliability of relay protection, an important factor is also the absence of the use of metal-intensive, expensive and bulky current transformers with metal cores, which meets the urgent issue of relay protection-energy and resource conservation, which in the future will have even more significant priorities in the electric power industry. The presented arc protection is applicable in all series of control panel cells for indoor and outdoor installations. All structural elements of this protection are made without the use of any metal structures, namely, lightweight and durable plastic, such as «PLA», printed on a 3D printer.

Keywords: photodiode, relay, luminous flux, alternative relay protection, resource saving.

<https://doi.org/10.48081/UOJD6207>

***В. Л. Исаев¹, В. А. Калытка²,
С. Н. Камарова³, Е. Г. Нешина⁴**

^{1,2,4}Қарағандинский технический университет имени Абылкаса Сагинова,
Республика Казахстан, г. Караганда;

³Қарағандинский индустриальный университет,
Республика Казахстан, г. Темиртау.

¹ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-1187-4638>

²ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-3232-1285>

³ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-8464-7204>

⁴ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-8973-2958>

*e-mail: cfekt.rfvfhjdf@mail.ru

МОДЕЛИРОВАНИЕ СОСТАВА УГОЛЬНЫХ СМЕСЕЙ С УЧЁТОМ ОБОБЩЁННОГО ГРАФИКА ТЕПЛОПОТРЕБЛЕНИЯ

В статье представлен обоснованный подход к формированию и планированию расхода угольной смеси, предназначенной для сжигания на тепловых электрических станциях (ТЭС), с учётом обобщённых графиков теплопотребления для городов Казахстана. Основой для расчётов послужили характерные климатические параметры регионов и показатели продолжительности тепловой нагрузки. Методика включает моделирование состава рабочей топливной смеси, сформированной из двух или трёх типов углей, отобранных на основе показателей их удельной теплотворной способности в рабочем состоянии.

Актуальность статьи связана с необходимостью повышения эффективности теплоснабжения в городах Казахстана за счёт рационального использования угля. Предложенный метод формирования угольных смесей с учётом климатических условий и графиков теплопотребления позволяет оптимизировать состав топлива, обеспечить стабильную работу ТЭС и сократить затраты.

Полученные результаты позволяют значительно повысить эффективность топливоподачи и адаптировать состав смеси к нормативным характеристикам топлива, обеспечивая при этом

согласованность с оптимальными режимами горения в топочных устройствах котлов. Такой подход способствует максимальному извлечению теплоты и её рациональному использованию в условиях изменяющихся климатических нагрузок, тем самым укрепляя устойчивость и экономическую обоснованность функционирования систем теплоснабжения в отопительный период.

Ключевые слова: тепловая нагрузка, рабочая смесь, теплотворная способность, рабочая масса, климатические параметры, устойчивость теплоснабжения.

Введение

Моделирование комбинированного топлива для котлов ТЭС, заменяющего нормативное, отражает стремление к экономии и эффективному использованию углей, заменяя дорогостоящие или труднодоступные виды топлива. Замена марки угля и топочных характеристик может ухудшить топочные процессы, снизив эффективность выработки пара для производства тепловой и электрической энергии. Методологический подход к прогнозированию запасов условного топлива и планированию метеорологической нагрузки в отопительный период с учетом региональной специфики Практика прогнозирования запасов условного топлива и планирования метеорологической нагрузки на отопительный период важна для учета региональных особенностей и оптимизации теплоэнергетических ресурсов. Задача расчета расхода условного топлива на основе обобщенных графиков продолжительности тепловой нагрузки актуальна для обеспечения энергоэффективности в городах страны. Основной целью данной статьи является обоснование рецептур смесей углей для замены нормативного топлива, подходящих для теплофикации городов Казахстана и прогнозирования годового расхода условного топлива [1, С. 43].

Материалы и методы

Конкретизация выбора городов была основана на показателях минимальных температур в течение отопительного сезона, так как именно они определяют верхнюю границу температурной генерации на тепловых электростанциях, а также оказывают влияние на величину удельного расхода условного топлива при производстве тепловой энергии. Прежде чем приступить к построению графика длительности действия тепловой нагрузки, была выполнена разработка зависимостей между тепловой нагрузкой и температурой наружного воздуха, учитывающая различные типы теплопотребления и фиксированные значения температуры окружающей среды: момент начала отопительного периода, расчетные температуры для систем отопления и вентиляции. Далее, на основе годовых графиков

продолжительности действия тепловой нагрузки, характерных для разных городов, был сформирован обобщённый усреднённый график [2, с. 55]. Для его построения применялись признанные расчетные подходы, обеспечивающие надёжность и обоснованность полученного результата [2, С. 56]; [3], С. 87].

Результаты и обсуждение

Одним из ключевых направлений повышения эффективности топливоподачи на тепловых электрических станциях (ТЭС) является рациональное формирование топливных смесей с учётом их теплотворной способности. Для достижения характеристик, приближенных к нормативному условному топливу, предлагается использовать аналитический подход к расчёту рецептур смесей на основе доступных марок угля, включая Карагандинский уголь марки К. Критерием оптимальности состава смеси выступает относительный показатель теплотворной способности в рабочем состоянии $Q_{рн}$, определяемый как отношение низшей теплоты сгорания конкретной марки угля к максимальному значению этого параметра среди всех углей, используемых в расчётах [4, С. 98]. В качестве эталонного значения принят показатель Кузнецкого угля, для которого $Q_{рн}^0 = 1$, соответствующий теплотворной способности 22,84 МДж/кг. Другие марки углей характеризуются пониженными значениями $Q_{рн}$ приведёнными в таблице 1.

Для получения смеси, угольная пыль различных марок дозируется в соответствии с расчетной рецептурой. Дозирование осуществляется известными пылевыми дозаторами, а процесс подготовки включает индивидуальное измельчение каждой марки угля в шаровых барабанных мельницах. Это позволяет обеспечить стабильные параметры тонкости помола и равномерность смешивания [5, С. 2124].

Таблица 1 – Характеристики разных марок углей

Уголь	Относительный показатель $Q_{рн}$	$Q_{рн}^0$, МДж/кг
Кузнецкий марка Д, класс Р,СШ	1	22,84
Шубаркольский марка Д, класс Р	0,985	22,5
Карагандинский марка К	0,939	21,33
Экибастузский марка СС, класс Р	0,734	16,76
Карагандинский(низкосортный) марка К, класс ШМ	0,712	16,26

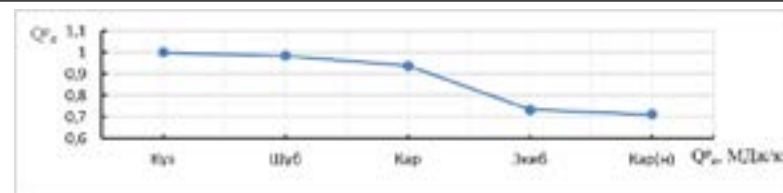


Рисунок 1 – Качество угля по относительному показателю.

В рамках настоящего исследования поставлена задача формирования топливной смеси с относительным показателем теплоты сгорания $Q_{рн}$ приближенным к значению, характерному для Карагандинского угля (0,939). Были проведены расчёты для смеси 2-х и 3-х углей угольных композиций, составленных из углей различных марок, с варьированием массовых долей компонентов в диапазоне от 0,15 до 0,80. Подбор соотношений осуществлялся таким образом, чтобы итоговая смесь обеспечивала достижение заданного значения $Q_{рн}^0 = 0,939$. На основе полученных расчётов аналитически выявлены функциональные зависимости между процентным содержанием компонентов смеси и результирующим значением относительного показателя теплоты сгорания. Установленные зависимости позволяют формировать угольные смеси с допустимым отклонением в пределах $\pm 0,05$ от целевого значения.

Расчет низшей теплоты сгорания для смеси из двух углей. Расчет смеси углей будет производиться с использованием методов [6, Р. 77; 7], для двух углей по критерию низшей теплоты сгорания рабочей массы 21,33 Дж/кг без учета физико-химического состава по сере и азоту.

Кузнецкий (с показателем $\Pi_{у1}$), Карагандинский низкосортный (с показателем $\Pi_{у2}$) критерий искомой смеси двух топлив должен стремиться к 0,939:

$$\frac{\Pi_{у1} + \Pi_{у2}}{2} \rightarrow 0,939 \quad (1)$$

Таблица-2 – Низшая теплота сгорания n-ого процента топлива для смеси из двух углей

Уголь	20 %	40 %	60 %	80 %
Кузнецкий	4,57	9,136	13,704	18,272
Шубаркольский	4,5	9	13,5	18
Карагандинский	4,266	8,532	12,798	17,064
Экибастузский	3,352	6,704	10,056	13,408
Карагандинский(низкосортный)	3,252	6,504	9,756	13,008

В дальнейших расчетах производится подбор смеси через процентное соотношение каждого угля в пропорциях 0,2–0,8, 0,4–0,6, 0,6–0,4, 0,8–0,2. И построение графика по расчетным относительным показателям Q_{pi}^u . При пересечении линий «смесь углей» и «нормативный уголь» на графике, получается смесь, подходящая для замены нормативного угля для котлов ТП-13. В дальнейшем по графику берется точное соотношение смеси.

Таблица 3 – Смесь двух углей Шубарколь- Экибастуз

	20 %-80 %	40 %-60 %	60 %-40 %	80 %-20 %
Q_{pi}^u	17,908	19,056	20,204	21,352
Q_{pi}^u / Q_{Pmax}^u	0,784	0,834	0,884	0,935

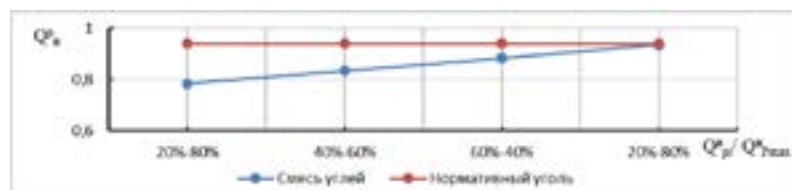


Рисунок 2 – Смесь двух углей Шубарколь-Экибастуз

Таблица 4 – Смесь двух углей Кузнецкий-Шубаркольский

	20 %-80 %	40 %-60 %	60 %-40 %	80 %-20 %
Q_{pi}^u	22,57	22,636	22,704	22,772
Q_{pi}^u / Q_{Pmax}^u	0,988	0,991	0,994	0,997

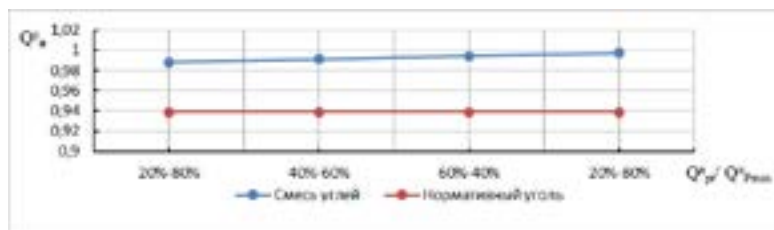


Рисунок 3 – Смесь двух углей Кузнецкий-Шубаркольский

Таблица 5 – Смесь двух углей Шубаркольский–Карагандинский (низкосортный)

	20 %-80 %	40 %-60 %	60 %-40 %	80 %-20 %
Q_{pi}^u	17,508	19,056	20,004	21,252
Q_{pi}^u / Q_{Pmax}^u	0,766	0,834	0,876	0,93

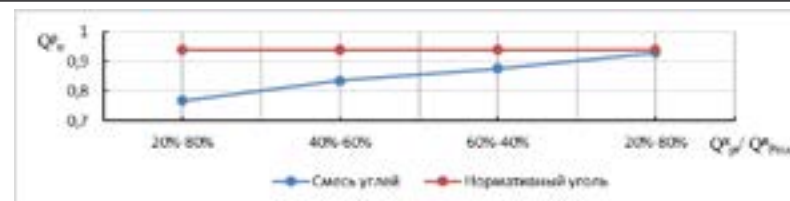


Рисунок 4 – Смесь двух углей Шубаркольский-Карагандинский (низкосортный)

Таблица 6 – Смесь двух углей Шубаркольский-Карагандинский

	20 %-80 %	40 %-60 %	60 %-40 %	80 %-20 %
Q_{pi}^u	21,564	21,798	22,032	22,262
Q_{pi}^u / Q_{Pmax}^u	0,944	0,954	0,964	0,975

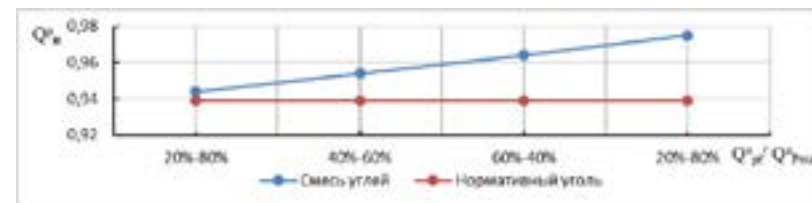


Рисунок 5 – Смесь двух углей Шубаркольский-Карагандинский

Таблица 7 – Смесь двух углей Кузнецкий-Карагандинский

	20 %-80 %	40 %-60 %	60 %-40 %	80 %-20 %
Q_{pi}^u	21,634	21,934	22,236	22,538
Q_{pi}^u / Q_{Pmax}^u	0,947	0,96	0,973	0,986

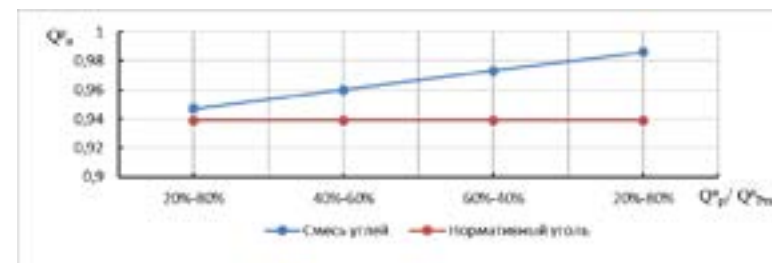


Рисунок 6 – Смесь двух углей Кузнецкий-Карагандинский

Таблица 8 – Смесь двух углей Кузнецкий-Экибастузский

	20 %-80 %	40 %-60 %	60 %-40 %	80 %-20 %
$Q_{н}^p$	17,978	19,192	20,408	21,624
Q_{pl}^u / Q_{Pmax}^u	0,787	0,84	0,893	0,946

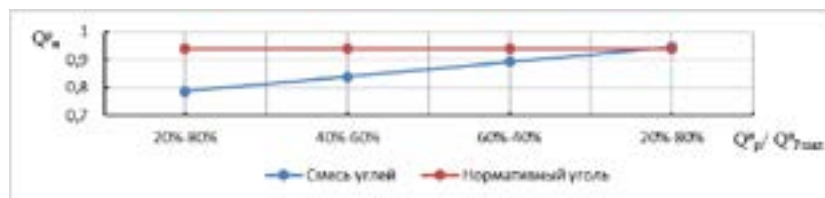


Рисунок 7 – Смесь двух углей Кузнецкий-Экибастузский

Таблица 9 – Смесь двух углей Кузнецкий-Карагандинский (низкосортный)

	20 %-80 %	40 %-60 %	60 %-40 %	80 %-20 %
$Q_{н}^p$	17,578	18,892	20,208	21,524
Q_{pl}^u / Q_{Pmax}^u	0,769	0,827	0,885	0,942

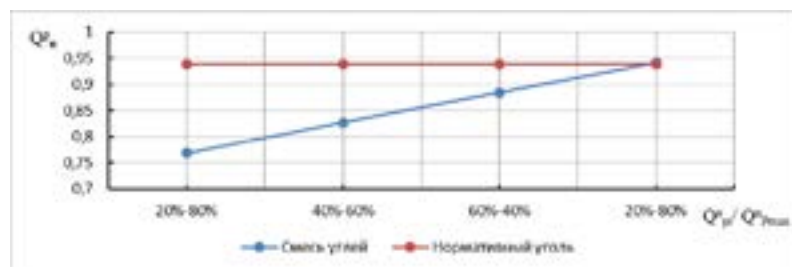


Рисунок 8 – Смесь двух углей Кузнецкий-Карагандинский (низкосортный)

Таблица 10 – Смесь двух углей Карагандинский-Экибастузский

	20 %-80 %	40 %-60 %	60 %-40 %	80 %-20 %
$Q_{н}^p$	17,674	18,588	19,302	20,416
Q_{pl}^u / Q_{Pmax}^u	0,774	0,814	0,854	0,893

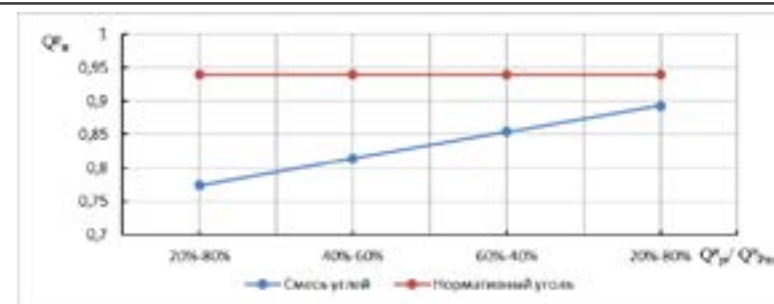


Рисунок 9 – Смесь двух углей Карагандинский-Экибастузский

Таблица-11 – Смесь двух углей Экибастузский-Карагандинский (низкосортный)

	20 %-80 %	40 %-60 %	60 %-40 %	80 %-20 %
$Q_{н}^p$	16,36	16,46	16,56	16,66
Q_{pl}^u / Q_{Pmax}^u	0,716	0,72	0,725	0,729

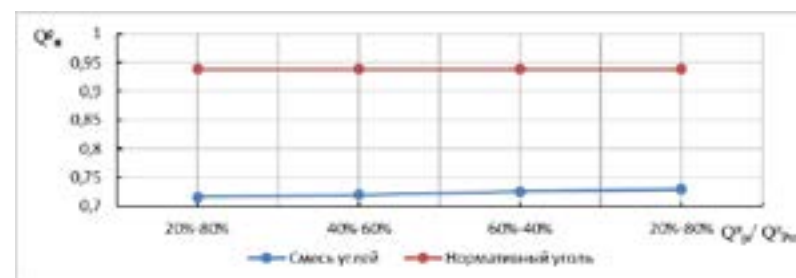


Рисунок 10 – Смесь двух углей Экибастузский-Карагандинский (низкосортный)

После расчетов было получено 4 смеси, удовлетворяющие показателю нижней теплоты сгорания $Q_{н}^p$ Карагандинского угля равной 0,937 относительного показателя:

- 1 Шубаркольский уголь – Карагандинский низкосортный уголь в соотношении 83 %–17 %;
- 2 Кузнецкий уголь – Экибастузский уголь в соотношении 76 %–24 %;
- 3 Кузнецкий уголь – Карагандинский низкосортный уголь в соотношении 77 %–23 %;
- 4 Шубаркольский уголь - Экибастузский уголь в соотношении 80 %–20 %.

Расчет низшей теплоты сгорания для смеси из трех углей [6, р. 77], для трех углей по критерию низшей теплоты сгорания рабочей массы 21, 33 Дж/кг без учета содержания серы и азота в физико-химическом составе.

Кузнецкий (с показателем Π_{y1}), Карагандинский (с показателем Π_{y3}), Карагандинский низкосортный (с показателем Π_{y3}) критерий искомой смеси двух топлив должен стремиться к 0,939:

$$\frac{\Pi_{y1} + \Pi_{y2} + \Pi_{y3}}{3} \rightarrow 0,939 \quad (2)$$

Таблица 12 – Низшая теплота сгорания n-ого процента топлива для смеси из трех углей

Уголь	15 %	25 %	33 %	50 %	70 %
Кузнецкий	3,426	5,71	7,613	11,42	15,988
Шубаркольский	3,375	5,625	7,5	11,25	15,75
Карагандинский	3,199	5,332	7,039	10,665	14,931
Экибастузский	2,514	4,19	5,587	8,38	11,732
Карагандинский(низкосортный)	2,439	4,065	5,42	8,13	11,382

Таблица – 13 – Смесь трех углей Кузнецкий-Шубаркольский-Карагандинский

	(15-15-70)%	(15-70-15)%	(70-15-15)%	(33-33-33)%	(25-25-50)%	(25-50-25)%	(50-25-25)%
$Q_{п}^p$	21,732	22,375	22,562	22,152	22	22,292	22,377
$Q_{п}^u / Q_{pmax}^u$	0,951	0,979	0,988	0,97	0,963	0,976	0,98

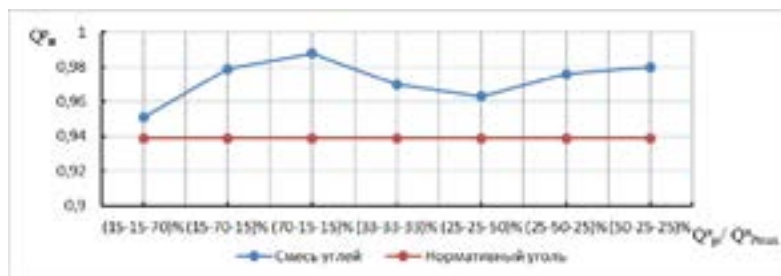


Рисунок 11 – Смесь трех углей Кузнецкий-Шубаркольский-Карагандинский

Таблица 14 – Смесь трех углей Кузнецкий-Шубаркольский-Экибастузский

	(15-15-70)%	(15-70-15)%	(70-15-15)%	(33-33-33)%	(25-25-50)%	(25-50-25)%	(50-25-25)%
$Q_{п}^p$	18,533	21,69	21,877	20,7	19,715	21,15	21,235
$Q_{п}^u / Q_{pmax}^u$	0,811	0,949	0,958	0,906	0,863	0,926	0,929

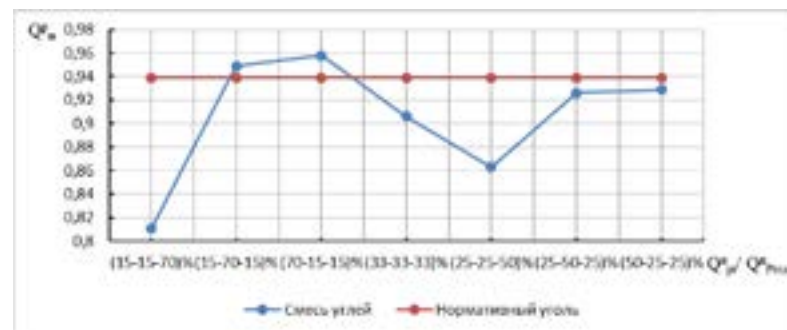


Рисунок 12 – Смесь трех углей Кузнецкий-Шубаркольский-Экибастузский

Таблица 15 – Смесь трех углей Кузнецкий-Шубаркольский-Карагандинский (низкосортный)

	(15-15-70)%	(15-70-15)%	(70-15-15)%	(33-33-33)%	(25-25-50)%	(25-50-25)%	(50-25-25)%
$Q_{п}^p$	18,183	21,615	21,802	20,533	19,465	21,025	21,11
$Q_{п}^u / Q_{pmax}^u$	0,796	0,946	0,953	0,899	0,852	0,92	0,924

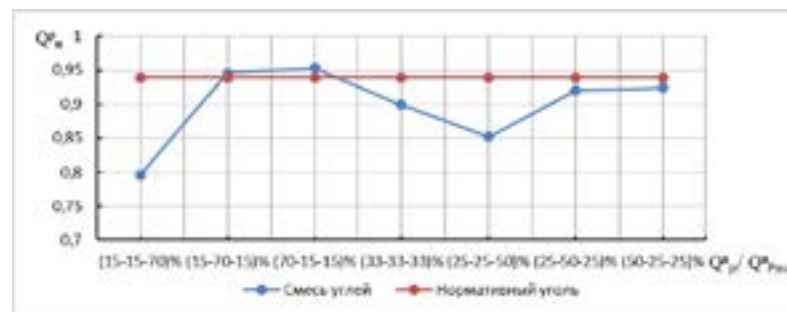


Рисунок 13 – Смесь трех углей Кузнецкий-Шубаркольский-Карагандинский (низкосортный)

Таблица 16 – Смесь трех углей Шубаркольский-Карагандинский-Экибастузский

	(15-15-70)%	(15-70-15)%	(70-15-15)%	(33-33-33)%	(25-25-50)%	(25-50-25)%	(50-25-25)%
Q_{II}^p	18,306	20,82	21,463	20,126	19,087	20,48	20,772
Q_{PI}^H / Q_{Pmax}^H	0,801	0,911	0,939	0,881	0,835	0,896	0,909

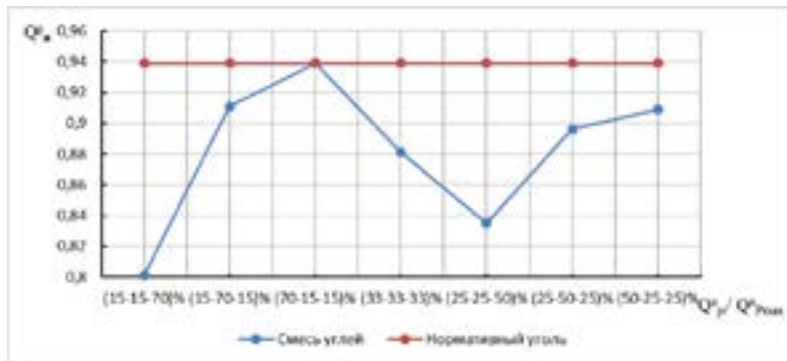


Рисунок 14 – Смесь трех углей Шубаркольский-Карагандинский-Экибастузский

Таблица 17 – Смесь трех углей Шубаркольский- Карагандинский- Карагандинский (низкосортный)

	(15-15-70)%	(15-70-15)%	(70-15-15)%	(33-33-33)%	(25-25-50)%	(25-50-25)%	(50-25-25)%
Q_{II}^p	17,956	20,745	21,388	19,959	19,087	20,335	20,647
Q_{PI}^H / Q_{Pmax}^H	0,786	0,908	0,936	0,874	0,836	0,891	0,903

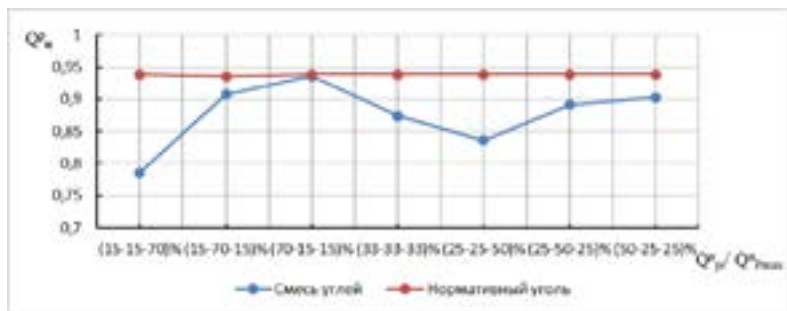


Рисунок 15 – Смесь трех углей Шубаркольский-Карагандинский-Карагандинский (низкосортный)

Таблица 18 – Смесь трех углей Кузнецкий-Карагандинский- Экибастузский

	(15-15-70)%	(15-70-15)%	(70-15-15)%	(33-33-33)%	(25-25-50)%	(25-50-25)%	(50-25-25)%
Q_{II}^p	18,357	20,871	21,701	20,239	19,422	20,535	20,942
Q_{PI}^H / Q_{Pmax}^H	0,803	0,913	0,950	0,886	0,85	0,899	0,916

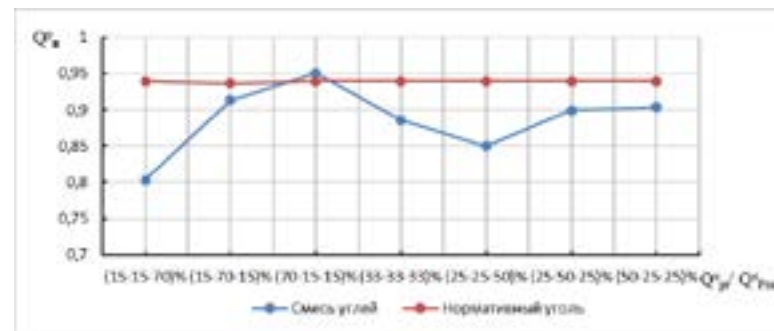


Рисунок 16 – Смесь трех углей Кузнецкий-Карагандинский-Экибастузский

Таблица 19 – Смесь трех углей Кузнецкий-Карагандинский- Карагандинский (низкосортный)

	(15-15-70)%	(15-70-15)%	(70-15-15)%	(33-33-33)%	(25-25-50)%	(25-50-25)%	(50-25-25)%
Q_{II}^p	18,007	20,796	21,626	20,072	19,172	20,44	20,817
Q_{PI}^H / Q_{Pmax}^H	0,788	0,91	0,946	0,879	0,839	0,895	0,911

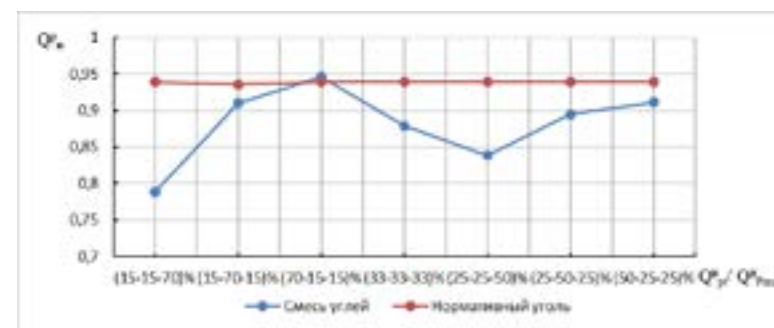


Рисунок 17 – Смесь трех углей Кузнецкий-Карагандинский-Карагандинский (низкосортный)

Таблица 20 – Смесь трех углей Кузнецкий-Экибастузский- Карагандинский (низкосортный)

	(15-15-70)%	(15-70-15)%	(70-15-15)%	(33-33-33)%	(25-25-50)%	(25-50-25)%	(50-25-25)%
Q_{pi}^p	17,322	17,597	20,941	18,62	18,03	18,155	19,675
Q_{pi}^n / Q_{Pmax}^n	0,758	0,77	0,916	0,815	0,789	0,794	0,861

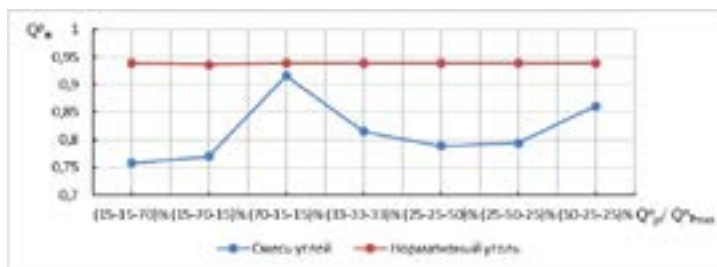


Рисунок 18 – Смесь трех углей Кузнецкий-Экибастузский- Карагандинский (низкосортный)

Таблица 21 – Смесь трех углей Шубаркольский-Экибастузский- Карагандинский (низкосортный)

	(15-15-70)%	(15-70-15)%	(70-15-15)%	(33-33-33)%	(25-25-50)%	(25-50-25)%	(50-25-25)%
Q_{pi}^p	17,271	17,546	20,703	18,507	17,945	18,07	19,505
Q_{pi}^n / Q_{Pmax}^n	0,756	0,768	0,906	0,81	0,786	0,791	0,853

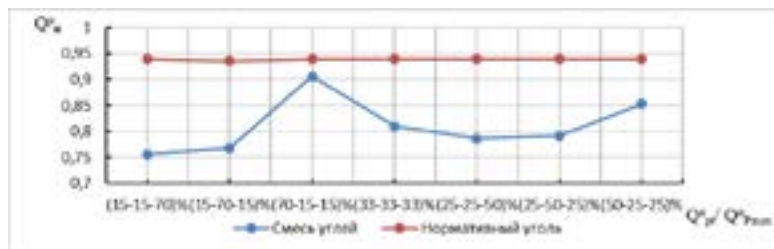


Рисунок 19 – Смесь трех углей Кузнецкий-Экибастузский- Карагандинский (низкосортный)

Таблица 22 – Смесь трех углей Карагандинский-Экибастузский- Карагандинский (низкосортный)

	(15-15-70)%	(15-70-15)%	(70-15-15)%	(33-33-33)%	(25-25-50)%	(25-50-25)%	(50-25-25)%
--	-------------	-------------	-------------	-------------	-------------	-------------	-------------

Q_{pi}^p	17,095	17,37	19,884	18,046	17,652	17,777	18,92
Q_{pi}^n / Q_{Pmax}^n	0,748	0,76	0,87	0,79	0,773	0,778	0,828

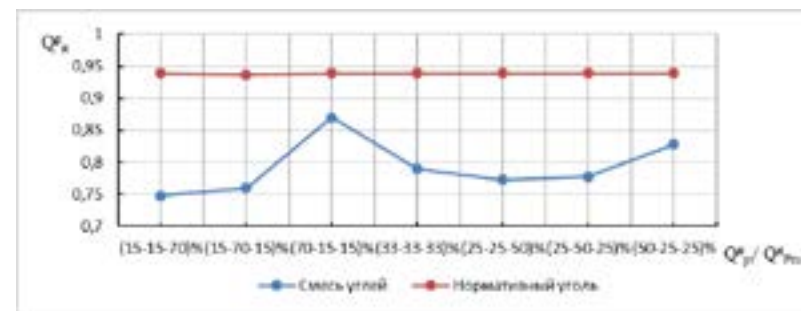


Рисунок 20 – Смесь трех углей Карагандинский-Экибастузский- Карагандинский (низкосортный)

После расчетов было получено 9 смеси удовлетворяющие показателю нижней теплоты сгорания Q_{pi}^n Карагандинского угля равной 0,937 относительного показателя:

Кузнецкий уголь – Шубаркольский уголь – Экибастузский уголь в соотношении 15 %–65 %–20 %, 62%–15 %–23 %.

Кузнецкий уголь – Шубаркольский уголь – Карагандинский низкосортный уголь в соотношении 15 %–66 %–19%, 70 %–10 %–20 %, 50 %–30 %–20 %.

Шубаркольский уголь – Карагандинский уголь – Экибастузский уголь в соотношении 60 %–26%–14 %.

Кузнецкий уголь – Карагандинский уголь – Экибастузский уголь в соотношении 71 %–9 %–20 %, 65 %–15 %–20 %.

Кузнецкий уголь – Карагандинский уголь – Карагандинский низкосортный уголь в соотношении 71 %–10 %–19 %.

Смешение отдельных марок угля осуществляется непосредственно на складе ТЭС, перед подачей в мельницы и пылеприготовление с учетом текущего графика тепловой нагрузки. Такой подход позволяет гарантировать однородность смеси до стадии помола и исключает необходимость доизмельчения на котле.

Требуется установить дополнительно для дозирования силосы – накопители для каждой марки угля, соединенной автоматизированной системой управления. Необходимо в раз смену проводить лабораторные проверки проб по ГОСТ 147-2013 (ISO 1928:2009) «Твердое топливо минеральное. Определение высшей теплоты сгорания и расчет нижней теплоты сгорания».

Смесь угольной пыли снижает разброс частиц по размерам, что будет повышать качество тонкодисперсного помола и увеличивать степень тонкости. Электроэнергия, затрачиваемая на подготовку угольной пыли и системы дозирования, составляет порядка 0,05–0,1 % от выработки станции ($\approx 0,2 \text{ кВт} \cdot \text{ч/т}$ смеси), дополнительного расхода не требуется, так как смешивание производится в сухом виде.

С учетом длительности тепловой нагрузки возможно обоснование рациональных угольных композиций для замены стандартного вида топлива, которые подходят для использования в системах теплофикации городов Казахстана.

Построение зависимости тепловой нагрузки от показателей наружной температуры воздуха позволяет формировать стратегии обеспечения потребностей в тепле по различным категориям теплопотребления при изменяющихся температурных условиях – от начала отопительного сезона до расчетных температур, применяемых при проектировании систем отопления и вентиляции [8, с. 55].

Аналитические данные, полученные в ходе исследований, способствуют совершенствованию процессов сжигания угля и рациональному использованию выделяемой тепловой энергии [9, с. 275], что особенно важно для поддержания устойчивой работы энергосистем в условиях сезонных климатических колебаний и увеличенных тепловых нагрузок в зимний период в городах с ТЭЦ.

Такие подходы позволяют не только прогнозировать необходимые объемы топлива на предстоящий отопительный сезон, но и производить расчет эквивалента условного топлива в соответствии с разработанными рецептурами топливных смесей.

В процессе анализа отопительных потребностей крупных городов республики были учтены климатические особенности населенных пунктов: применялись параметры температурных режимов и длительности отопительного сезона для пяти наиболее холодных и пяти самых теплых городов Казахстана [10, с. 9]. Дополнительно был построен сопоставительный график, отражающий средние температурные значения января в этих городах, что позволило выделить региональные различия в нагрузках на теплоснабжение.

Таблица 23 – Климатологические параметры для самых холодных и самых теплых городах Казахстана [10, с. 9]

Город	Абсолютная минимальная температура (°C)	Температура воздуха на наиболее холодной пятидневки (°C)	Температура в январе (°C)	Продолжительность отопительного периода
Петропавловск	-45,0	-37,8	-16,8	25.09-01.05
Усть-Каменогорск	-48,9	-37,3	-15,8	04.10-24.04
Павлодар	-45,5	-34,6	-16,6	02.10-25.04
Кокшетау	-44,8	-33,7	-14,9	28.09-30.04
Астана	-51,6	-31,2	-15,1	29.09-26.04
Туркестан	-38,6	-20,6	-3,9	28.10-24.03
Алматы	-37,7	-20,1	-5,3	22.10-03.04
Актобе	-48,5	-15,1	-13,3	04.10-20.04
Ақтау	-27,7	-14,9	-1,2	07.11-02.04
Шымкент	-30,3	-14,3	-1,5	06.11-22.03

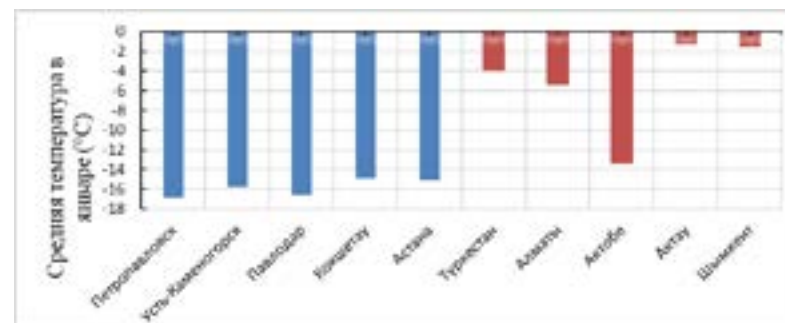


Рисунок 21 – Сравнительный анализ января: от самых тёплых до самых холодных городов Казахстана

Выводы

В настоящем исследовании анализируются пути повышения энергетической эффективности угольного топлива, применяемого на теплоэлектростанциях (ТЭЦ) в условиях Республики Казахстан. Основное внимание уделено вопросам адаптации характеристик топливной смеси к специфике климатических условий региона, а также совершенствованию процессов подготовки и сжигания угля с целью достижения более полного теплового использования топлива и снижения технологических потерь. В центре внимания – создание моделей смесей углей различных марок, включая Кузнецкий, Шубаркольский, Карагандинский и Экибастузский, с

целью повышения их энергетической ценности и улучшения параметров тепловых процессов в холодный сезон. Авторы выполнили анализ различных вариантов комбинирования указанных углей, варьируя их соотношение, что позволило выявить более рациональные топливные составы. Кроме того, в статье представлены сводные графики, отражающие продолжительность климатических нагрузок для ряда казахстанских городов. Эти данные используются для учета погодных условий при прогнозировании и планировании потребления топлива на ТЭЦ в отопительный период.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

- 1 **Жданова, Н. К., Гончаров, В. И.** Методы оптимизации расхода топлива на ТЭЦ [Текст] // Энергетические технологии и ресурсы, – 7 (1). – 2022. – С. 42–49.
- 2 **Манюк, В. И., Каплинский, Ю. И., Хиж, Е. Б., Манюк, А. И., Ильин, В. К.** Наладка и эксплуатация водяных тепловых сетей [Текст]. – М. : Стройиздат, – 2018. – 432 с.
- 3 **Сафаров, А. П.** Сборник задач по теплотфикации и тепловым сетям [Текст]. – М. : Энергоатомиздат, 2015. – 232 с.
- 4 **Маркина, Т. М., Морозова, Е. И.** Моделирование тепловых нагрузок в условиях переменчивого климата [Текст] // Теплоэнергетика, – 59(2). – 2020. – С. 59–66.
- 5 **Vasquez, R., Rodriguez, A. L.,** Coal blends and their application to power plants [Text] // Energy Sources, Part A: Recovery, Utilization, and Environmental Effects. – 41(17). – 2019. – P. 2122–2134.
- 6 **Никифоров, И. В., Павлов, В. В.** Анализ теплоснабжения в промышленных регионах [Текст] // Журнал энергетических исследований – 28(4). – 2021. – С. 77–83.
- 7 **Kuznetsov G. V., Yankovsky S. A., A. A. Tolokolnikov, Zenkov A. V., Cherednik I. V.** Conditions and characteristics of mixed fuel granules ignition based on coal and finely dispersed wood [Text] // Energy Volume 194. – 1 March, – 2020. – <https://doi.org/10.1016/j.energy.2020.116896>
- 8 **Исаев В. Л.** Расход условного топлива по обобщенному графику продолжительности тепловой нагрузки городов ЕАЭС [Текст] // Научный журнал. Механика и технологии – 2021. – №3(73). – С. 50–57.
- 9 **Петров, А. Г., Казанцев, Р. В.** Прогнозирование расхода угля для отопительных сезонов [Текст] // Теплотехника. – 54(4). – 2016. – С. 273–281.
- 10 СП РК 2.04-01-2017 Строительная климатологи, Астана. – 2017. Дата введения – 2017–12–20.

REFERENCES

- 1 **Zhdanova, N. K., Goncharov, V. I.** Metody optimizacii rashoda topliva na TETS [Methods for optimizing fuel consumption at a thermal power plant] [Text] // Energy Technologies and Resources. – 7(1). – 2022. – P. 42–49.
 - 2 **Manyuk, V. I., Kaplinskiy, Yu. I., Khizh, E. B., Manyuk, A. I., Il'in, V. K.** Naladka i ekspluatatsiya vodyanykh teplovykh setej [Installation and operation of water heating networks] [Text]. – М. : Strojizdat, – 2018. – 432 p.
 - 3 **Safonov, A. P.** Sbornik zadach po teplotifikacii i teplovyim setyam [Collection of tasks on heating and heating networks] [Text]. – М. : Energoatomizdat, – 2015. – 232 p.
 - 4 **Markina, T. M., Morozova, E. I.** Modelirovanie teplovykh nagruzok v usloviyakh peremenchivogo klimata [Modeling of thermal loads in a changeable climate] [Text] // Thermal power engineering, – 59(2). – 2020. – P. 59–66.
 - 5 **Vasquez, R., Rodriguez, A. L.** Coal blends and their application to power plants [Text] // Energy Sources. – Part A: Recovery, Utilization, and Environmental Effects. – 41(17). – 2019. – P. 2122–2134.
 - 6 **Nikiforov, I. V., Pavlov, V. V.** Analiz teplosnabzheniya v promyshlennykh regionakh [Analysis of heat supply in industrial regions] [Text] // Journal of Energy Research, 28(4). – 2021. – P. 77–83.
 - 7 **Kuznetsov, G. V., Yankovsky S. A., A. A. Tolokolnikov., Zenkov A. V., Cherednik I. V.** Conditions and characteristics of mixed fuel granules ignition based on coal and finely dispersed wood [Text] // Energy Volume 194. – 1 March, – 2020. – <https://doi.org/10.1016/j.energy.2020.116896>
 - 8 **Isaev, V. L.** Raskhod uslovnogo topliva po obobshchennomu grafikhu prodolzhitel'nosti teplovoj nagruzki gorodov EAES [The consumption of conventional fuel according to the generalized schedule of the duration of the heat load of the cities of the EAEU] [Text] // Scientific Journal. Mechanics and Technologies. – 2021. – No. 3(73). – P. 50–57.
 - 9 **Petrov, A. G., Kazantsev, R. V.** Prognozirovanie raskhoda uglya dlya otopitel'nykh sezonov [Forecasting coal consumption for heating seasons] [Text] // Thermal engineering, – 54(4). – 2016. – P. 273–281.
 - 10 SP RK 2.04-01-2017. Stroitel'naya klimatologiya [Construction Climatology] [Text]. – Astana. – 2017. The date of introduction – 2017–12–20.
- 19.02.25 ж. баспаға түсті.
07.08.25 ж. түзетулерімен түсті.
05.12.25 ж. басып шығаруға қабылданды.

*В. Л. Исаев¹, В. А. Калытка², С. Н. Камарова³, Е. Г. Нешина⁴
^{1,2,4}Ә. Сағынов атындағы Қарағанды техникалық университеті,
Қазақстан Республикасы, Қарағанды қ.;
³Қарағанды индустриалды университеті,
Қазақстан Республикасы, Теміртау қ.
Поступило в редакцию 19.02.25.
Поступило с исправлениями 07.08.25.
Принято в печать 05.12.25.

ЖАЛПЫЛАНҒАН ЖЫЛУ ТҰТЫНУ ГРАФИГІН ЕСКЕРЕ ОТЫРЫП, КӨМІР ҚОСПАЛАРЫНЫҢ ҚҰРАМЫН МОДЕЛЬДЕУ

Мақалада Қазақстан қалалары үшін жылу тұтынудың жалпыланған кестелерін ескере отырып, жылу электр станцияларында (ЖЭС) жағуға арналған көмір қоспасының шығынын қалыптастыруға және жоспарлауға негізделген тәсіл ұсынылған. Есептеулерге аймақтарға тән климаттық параметрлер мен жылу жүктемесінің ұзақтығы алынды. Әдістеме жұмыс күйіндегі меншікті жану жылуы бойынша таңдалған екі немесе үш түрлі көмір түрінен тұратын жұмыс отынының құрамын модельдеуді қамтиды.

Мақаланың өзектілігі Қазақстан қалаларында көмірді ұтымды пайдалану арқылы жылумен жабдықтаудың тиімділігін арттыру қажеттілігімен байланысты. Климаттық жағдайлар мен жылу тұтыну кестелерін ескере отырып, көмір қоспаларын қалыптастыру әдісі отын құрамын оңтайландыруға, ЖЭС-тің тұрақты жұмысын қамтамасыз етуге және шығындарды азайтуға мүмкіндік береді.

Алынған нәтижелер отынмен қамтамасыз етудің тиімділігін едәуір арттыруға және қоспа құрамын отынның нормативтік сипаттамаларына бейімдеуге мүмкіндік береді, бұл қазандықтардың жану құрылғыларында оңтайлы жану режимдеріне қол жеткізуге жағдай жасайды. Мұндай тәсіл жылу энергиясын барынша алуға және оны климаттық жүктемелер өзгеріп отыратын жағдайда ұтымды пайдалануға ықпал етеді, осылайша жылыту кезеңінде жылумен жабдықтау жүйелерінің тұрақтылығы мен экономикалық тиімділігін арттырады.

Кілтті сөздер: жылу жүктемесі, жұмыс қоспасы, жылу шығарғыштық қабілеті, жұмыс массасы, климаттық параметрлер, жылумен жабдықтаудың тұрақтылығы.

*V. L. Isaev¹, V. A. Kalytka², S. N. Kamarova³, E. G. Neshina⁴
^{1,2,4}Abylkas Saginov Karaganda Technical University,
Republic of Kazakhstan, Karaganda;
³Karaganda industrial University, Republic of Kazakhstan, Temirtau.
Received 19.02.25.
Received in revised form 07.08.25.
Accepted for publication 05.12.25.

MODELING OF COAL BLEND COMPOSITION CONSIDERING THE GENERALIZED HEAT DEMAND CURVE

The article presents a well-founded approach to the formation and planning of coal mixture consumption intended for combustion at thermal power plants (TPPs), taking into account generalized heat consumption schedules for cities in Kazakhstan. The calculations are based on the characteristic climatic parameters of the regions and the duration of heat load. The methodology includes modeling the composition of a working fuel mixture consisting of two or three types of coal, selected based on their specific calorific value in working condition.

The relevance of the article lies in the need to improve the efficiency of heat supply in Kazakhstan's cities through the rational use of coal. The proposed method of forming coal mixtures, considering climatic conditions and heat consumption schedules, allows for optimization of the fuel composition, ensures stable operation of TPPs, and reduces costs.

The results obtained significantly increase the efficiency of fuel supply and allow the fuel mixture to be adapted to regulatory characteristics, while ensuring compatibility with optimal combustion modes in boiler furnaces. This approach contributes to the maximum extraction and rational use of heat energy under changing climatic loads, thereby enhancing the stability and economic viability of heat supply systems during the heating period.

Keywords: heat load, working fuel blend, calorific value, working mass, climatic parameters, heat supply resilience.

<https://doi.org/10.48081/ZPQQ4614>

***С. С. Исенов¹, Қ. Б. Байбейсенова²,
Г. С. Нұрмағанбетова³**

^{1,2,3}С. Сейфуллин атындағы Қазақ агротехникалық зерттеу университеті,
Қазақстан Республикасы, Астана қ.

¹ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-4576-4621>

²ORCID: <https://orcid.org/0009-0007-8482-8604>

³ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-9529-2477>

*e-mail: issenov.sultanbek@gmail.com

ШАҒЫН ЕЛДІ МЕКЕНДЕРДІҢ ЭНЕРГИЯМЕН ЖАБДЫҚТАУ ТИІМДІЛІГІ: ГИБРИДТІ ЖЕЛ-КҮН ҚОНДЫРҒЫЛАРЫ

Қазіргі таңда тұрақты энергетикаға жаһандық көшу және қазба ресурстарының сарқылуы жағдайында шағын ауылдық елді мекендерді сенімді әрі экологиялық таза электр энергиясымен қамтамасыз етудің тиімді әрі тұрақты шешімдеріне деген сұраныс артып келуде. Осындай жағдайда ең перспективалы бағыттардың бірі – күн және жел генерациясын біріктіретін гибридік жүйелерді пайдалану болып табылады. Мұндай жүйелер тәулік бойы үздіксіз сенімді энергиямен жабдықтауды қамтамасыз етіп, дәстүрлі отын көздеріне тәуелділікті азайтады, парниктік газдардың шығарындыларын төмендетеді және энергия шығындарын қысқартады. Мақала жазу аясында және зерттеу барысында гибридік жел-күн қондырғыларының артықшылықтары, олардың шалғай ауылдық аумақтар үшін әлеуметтік-экономикалық маңызы, сондай-ақ экологиялық және қаржылық тиімділігі қарастырылады. Сонымен қатар энергияны басқару мен жинақтаудың заманауи технологияларының орнықты даму контексіндегі рөлі айқындалады. Алынған нәтижелер Қазақстан Республикасының ауылдық өңірлерін тұрақты дамытудың негізі ретінде гибридік жүйелерді енгізудің тиімділігін дәлелдейді. Мұндай тәсіл ауыл инфрақұрылымының жаңғыруына, жұмыспен қамтудың артуына және жергілікті қоғамдастықтардың әлеуметтік тұрақтылығын нығайтуға

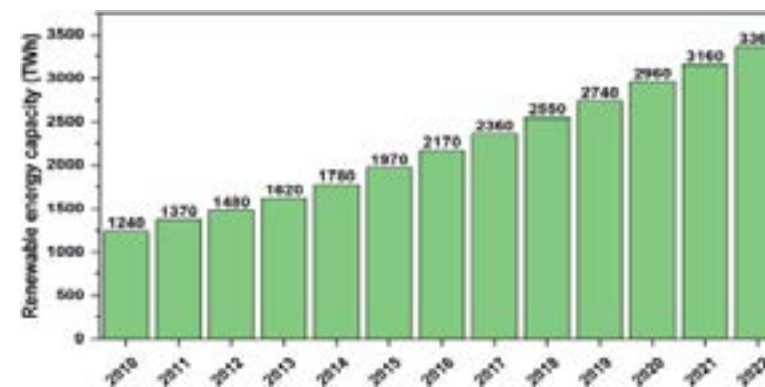
мүмкіндік береді. Зерттеу қорытындылары біздің еліміздің орнықты энергетикалық болашағын қалыптастыруға ғылыми негіз бола алады.

Кілтті сөздер: гибридік энергетика, жаңартылатын энергия көздері, жел-күн қондырғылары, энергия тиімділігі, шағын елді мекендер, тұрақты даму, орталықтандырылмаған электрмен жабдықтау.

Кіріспе

Қазба энергия көздері қорларының тұрақты қысқаруы және климаттың өзгеруі салдарына аландаушылықтың артуы әлемдік қоғамдастықты энергетикалық көшу процесінде шешуші сәтке алып келді. Осы трансформация жағдайында жаңартылатын энергия көздері (ЖЭК) базасындағы гибридік жүйелер (HRES), әсіресе күн және жел генерациясын біріктіретін жүйелер ерекше маңызға ие болады [1].

1-суретте энергетикалық ақпарат басқармасының (EIA) деректеріне сәйкес, жаңартылатын энергия көздері энергетикалық ландшафты қайта құрылымдауда маңызды рөл атқара бастаған 2010–2020 жылдар аралығында жаңартылатын энергетиканы жаһандық енгізу серпіні келтірілген [2]. Жаңартылатын көздерден электр энергиясын өндіру 2010 жылғы 1240 ТВт·сағ-тан 2020 жылы 2960 ТВт·сағ-қа дейін ұлғайды. Бұл айтарлықтай өсу неғұрлым экологиялық таза және орнықты энергетикалық шешімдерге көшудің тұрақты үрдісін куәландырады, бұған технологиялық жетістіктер, күшейтілген экологиялық талаптар және мемлекеттік саясат тарапынан қолдау ықпал етеді.



1-сурет – Жаңартылатын энергетиканың жаһандық бейімделуі 2010–2022 жылдары [2].

Энергетика саласындағы жаһандық сын-қатерлерге жауап ретінде әртүрлі қоғамдастықтар үшін сенімді және тұрақты электрмен жабдықтауды қамтамасыз етуге қабілетті баламалы энергия көздерін зерттеуге қызығушылықтың артуы байқалады [3]. Осы контексте жаңартылатын энергия көздері орталықтандырылған энергетикалық жүйелер шеңберінде де, автономды жүйелерде де белсенді дамуды көрсетеді. Алайда, дербес ЖЭК-жүйелер ұшырасатын түйінді проблемалардың бірі электр энергиясын генерациялаудағы тұрақсыздық пен ауытқулар болып қалып отыр. Бұл міндеттің тиімді шешімі гибриді күн-жел энергетикалық жүйелері (HSWES) болып табылады, олар энергиямен жабдықтаудың сенімділігін арттыруға, жалпы жұмыс тиімділігін жақсартуға және автономды жұмыс істеу үшін энергия жинақтауыштарға қажеттілікті азайтуға мүмкіндік береді [2].

Күн және жел энергиясының негізгі артықшылықтарының қатарына ауқымдылығы, қоршаған ортаға ең аз әсер етуі және ресурстардың кең қолжетімділігі жатады. Бұл көздерді бірыңғай гибридік жүйеге біріктіру әрбір технологияның артықшылықтарын күшейтуге және олардың жеке шектеулерін өтеуге мүмкіндік береді [4].

Материалдар мен әдістері

Зерттеу барысында Қазақстан Республикасының ауылдық елді мекендерін энергиямен жабдықтауда гибриді жел-күн жүйелерін қолданудың тиімділігін бағалау үшін салыстырмалы талдау әдісі пайдаланылды.

Негізгі деректер көзі ретінде KazHydromet, IRENA, IEA, UNDP Kazakhstan және HOMER Pro V.2 бағдарламалық кешенінің есептері қолданылды. Павлодар облысының шарттарына сәйкес 800 кВт*сағ орташа тәуліктік тұтынуы бар типтік ауыл моделі таңдалып, үш нұсқа – дизельдік, күн және гибриді жүйелер - бойынша энергия өндіру, шығындар, CO₂ шығарындылары мен сенімділік деңгейі салыстырылды. Әрбір жүйенің техникалық және экономикалық тиімділігі нақты климаттық деректер негізінде есептеліп, энергия теңгерімін оңтайландыруға бағытталған модельдеу нәтижелері талданды.

Нәтижелер және талқылау

Гибриді күн-жел энергетикалық жүйелерінің жаһандық нарығын зерттеу Латын Америкасын, Азия-Тынық мұхиты аймағын, Еуропаны, Солтүстік Американы, Австралияны және Африканы қоса алғанда, әлемнің әртүрлі өңірлерін қамтиды. Бұл нарықта негізгі позицияны таяу жылдары айтарлықтай өсу қарқыны күтілетін Азия-Тынық мұхиты өңірі алады [4].

Бұл өсу энергетика секторының белсенді дамуына, жеделдетілген индустрияландыруға және әсіресе Оңтүстік-Шығыс Азия елдерінде, сондай-ақ Қытай мен Үндістанда кең ауқымды урбанизацияға негізделген. Бұдан басқа, бұған қолайлы мемлекеттік саясат, көміртегі шығарындыларын

азайтуға күшейтілген назар және технологиялық прогресс ықпал етеді, бұл жиынтығында гибридік генерацияның өңірлік нарығының дамуына оң әсерін тигізеді [5].

Осылайша, Үндістан үкіметі өзінің тұрақты энергия көздеріне көшу стратегиясын жариялап, таза энергетиканы 2019 жылғы 86,3 ГВт-тан 2022 жылға қарай 175 ГВт-қа дейін ұлғайту және 2030 жылға қарай 450 ГВт-қа жету мақсатын қойды [6].

Солтүстік Америка өңірі де тұрақты нормативтік бастамалар мен энергия тиімділігі мен шығындарды қысқартуға назар аударудың арқасында әлемдік нарықта елеулі орын алады. АҚШ бұл үдерісте маңызды рөл атқарады: «Жасыл бағыт» аясында президент Д.Байден әкімшілігі 2050 жылға қарай экономиканың көміртекті бейтараптығына қол жеткізу және 2035 жылға қарай елдің энергетикалық секторын толық декарбонизациялау ниетін жариялады. Бұл ірі күн қондырғыларының (LSS) – қазіргі 74 ГВт-тан бастап – және жел қондырғыларының қуатын бірнеше есе арттыруды болжайды, олардың орнатылған қуаты бүгінгі күні 143 ГВт құрайды [7].

Таяу Шығыс пен Африканың энергияға сенімді қол жеткізу проблемаларымен бетпе-бет келетін өңірлері де гибридік шешімдерді біріктіруге қызығушылық танытуда, бұл энергетикалық қажеттіліктерді қанағаттандыру үшін осы технологиялардың әртүрлі артықшылықтарын пайдалануға мүмкіндік береді [8].

Гибриді күн-жел қондырғыларының әлемдік нарығындағы жетекші компаниялардың қатарына Alpha Windmills, Polar Power Inc., Gamesa, Supernova Technologies Pvt. Ltd., Grupo Dragon, Blue Pacific Solar Product Inc., ReGen сияқты өндірушілер жатады Powertech, UNITRON Energy System Pvt. Ltd. және Zenith Solar System [9].

2-суретте көрсетілген желіге қосылған гибридік энергетикалық жүйелерді жобалауға неғұрлым қолайлы компоненттер, олардың өлшемдері және орналасқан жері мен жүктемені ескере отырып, қоректендіруді басқару (ТБ) сияқты факторлар кіреді және оларды айқындайды.



1-сурет – Электр желісіне қосылған жаңартылатын энергияның гибридік жүйелері [10].

Гибридік күн-жел жүйесі екі технологияның негізгі артықшылықтарын біріктіреді, неғұрлым сенімді және тұрақты энергиямен жабдықтауды, электр энергиясын ұлғайтуды және пайдалану шығындарын азайтуды қамтамасыз етеді. Таза және тұрақты энергия өндіру есебінен қазба отынға тәуелділік азаяды және парниктік газдар шығарындылары азаяды. Мұндай жүйелерді қоғамдық энергетикалық желілерге интеграциялау электр энергиясын берудегі іркілістерге және сыртқы энергетикалық қатерлерге осалдықты азайтып, жергілікті энергетикалық автономияны арттыруға ықпал етеді.

Уақыт өте келе гибридік шешімдерді пайдалану жергілікті қоғамдастықтар үшін дәстүрлі көздерге тәуелділікті азайту арқылы электр энергиясына жұмсалатын шығындарды айтарлықтай азайту мүмкін. Бұдан басқа, жаңартылатын энергетикаға көшу қоршаған ортаны қорғауға және климаттық өзгерістердің салдарын жұмсартуға ықпал етеді.

Мұндай жүйелерді дамыту халықты тартуға, білім беру бағдарламаларын кеңейтуге және жаңартылатын энергия көздері туралы хабардар болу деңгейін арттыруға ықпал етеді, бұл өз кезегінде қоғамдастық ішіндегі жауапкершілік пен тұрақтылық сезімін нығайтады. Энергияны жергілікті өндіру шеңберінде энергия жинақтаушылармен және тарату желілерімен интеграцияланған гибридік жүйе дәстүрлі әдістерге тиімді және экологиялық таза балама болып табылады.

Мұндай қондырғылардың ерекшелігі – күн және жел компоненттері өндірістің ауытқуын өзара компенсациялайды: жел генераторлары түнде және қыста жұмыс істей алады, ал күн панельдері күндіз және жазда ең жоғары өнімділікті көрсетеді. Бұл тәулік пен жылдың түрлі уақыт кезеңдерінде тұтынушыларды сенімді энергиямен жабдықтауды қамтамасыз етеді.

Гибридік жел-күн жүйелері шағын елді мекендер үшін энергиямен жабдықтаудың ерекше тиімді тәсілі болып табылады, әсіресе орталықтандырылған электр желілеріне қолжетімділік шектеулі немесе жоқ шалғай және қол жетімділігі қиын өңірлерде. Қоршаған ортаға ең аз әсер ете отырып, электр энергиясын тұрақты және тұрақты өндіруді қамтамасыз ете отырып, мұндай қондырғылар орталықсыздандырылған энергиямен жабдықтау стратегиясының маңызды элементіне айналады. Екі тәуелсіз және өзара толықтырушы көздерді - күн және жел энергетикасын біріктіре отырып, гибридік жүйелер жабдықтау сенімділігін айтарлықтай арттырады және жалпы энергетикалық теңгерімді оңтайландырады. Күн панельдері күндізгі уақытта, әсіресе жаз мезгілінде энергия өндіреді, ал жел генераторлары негізінен түнде және күн белсенділігі төмен кезеңдерде белсенді болады, бұл әрбір көздің ауытқуын өтеуге мүмкіндік береді.

Қазақстан Республикасындағы кішігірім ауылдық елді мекендер үшін мұндай жүйелерді енгізу энергетикалық автономияны арттыруды ғана емес, сондай-ақ дизель отыны сияқты дәстүрлі отын түрлерінен бас тарту есебінен электр энергиясына жұмсалатын шығындарды едәуір төмендетуді білдіреді. Бұл отынды тасымалдау жоғары логистикалық шығындармен ұштасқан өңірлерде әсіресе өзекті. Бұдан басқа, гибридік қондырғылар әлеуметтік маңызы бар объектілер – мектептер, медициналық пункттер, сумен жабдықтау және байланыс жүйелері үшін тұрақты энергиямен жабдықтауды қамтамасыз ете отырып, жергілікті халықтың өмір сүру сапасын жақсартуға ықпал етеді. Өзінің модульдік құрылымы мен икемділігінің арқасында мұндай жүйелер нақты бір елді мекеннің қажеттіліктеріне оңай бейімделеді және энергия тұтынушының ұлғаюына қарай кеңейтілуі мүмкін.

Гибридік жүйелерді жобалау және енгізу Қазақстан Республикасының нақты өңірінің климаттық жағдайларын, энергия тұтыну сипатын, өндірістің ықтимал маусымдық және тәуліктік ауытқуларын, сондай-ақ энергия жинақтаушылардың оңтайлы көлемін таңдауды мұқият талдауды талап етеді. Заманауи интеллектуалды басқару жүйелерін пайдалану компоненттердің жұмысын тиімді реттеуге, жүктемелерді теңестіруге және шығындарды азайтуға мүмкіндік береді. Аккумуляторлық жүйелердің болуы өндірілген энергияның артығын аз генерация кезінде пайдалану мақсатында жинақтауда маңызды рөл атқарады. Мұндай шешімдер энергия тиімділігін жақсартуға ғана емес, жергілікті жерлерде орнықты, экологиялық бағытталған энергетикалық модельді қалыптастыруға да ықпал етеді.

Бастапқы инвестицияларға қарамастан, Қазақстан Республикасының шалғайдағы ауылдық елді мекендерінде гибридік жүйелерді орнату ұзақ мерзімді перспективада экономикалық жағынан ақталған болып табылады. Пайдалану шығындарының төмендеуі, отынды тұрақты сатып

алудың қажеттілігінің болмауы, жабдықтың ұзақ қызмет ету мерзімі және мемлекеттік субсидиялар мен қолдау бағдарламаларының қолжетімділігі мұндай жобаларды қаржылық тұрғыдан орнықты етеді. Сонымен қатар, мұндай бастамаларды іске асыру өңірдің технологиялық дамуына ғана емес, жергілікті халықты энергетикалық ресурстарды басқару процестеріне тарта отырып, экологиялық мәдениетті қалыптастыруға да ықпал етеді. ЖЭК енгізуге ілеспе білім беру және ақпараттық бағдарламалар жаңартылатын энергия көздерінің артықшылықтары туралы хабардар болу деңгейін арттырады және жауапты тұтынуға ықпал етеді.

Қазақстан Республикасында гибридік жел-күн энергетикалық жүйелерін қолдану энергия тиімділігін арттыру және шағын елді мекендерді тұрақты дамыту үшін кең мүмкіндіктер ашады. ЖЭК-тің екі негізгі түрінің артықшылықтарын біріктіре отырып, олар қазіргі және болашақ ұрпақтың қажеттіліктеріне жауап беретін тәуелсіз, орнықты және экологиялық таза болашақ энергетикасын қалыптастыру үшін сенімді негіз жасайды.

Гибридік жүйелердің энергия тиімділігін бағалау мақсатында нақты жағдайларда шағын елді мекеннің энергия тұтынуының типтік сипаттамаларына негізделген модельдік зерттеу жүзеге асырылды. Есептеулерде күннің жоғары белсенділігімен және қалыпты жел әлеуетімен ерекшеленетін Қазақстанның дала және жартылай шөлейт өңірлерінің шарттарына сәйкес келетін орташаланған деректер пайдаланылды.

Жүргізілген талдау үшін Павлодар облысында 500 халқы бар елді мекен қаралды. Электр энергиясын орташа тәуліктік тұтыну 800 кВт*сағат құрады, бұл жылдық көлемге шамамен 292 000 кВт*сағат сәйкес келеді. Базалық нұсқа ретінде халықтың қажеттілігін толық қамтамасыз ететін дәстүрлі дизельді электр станциясы ұсынылды. Салыстырмалы талдау энергиямен жабдықтаудың мынадай нұсқалары арасында жүзеге асырылды:

- 1-нұсқа – дизель генерациясы;
- 2 нұсқа – автономды күн жүйесі;
- 3-нұсқа – гибридік күн-жел жүйесі (HSWES).

Гибридік жүйенің конфигурациясы мыналарды қамтиды:

- жалпы қуаты 100 кВт фотоэлектрлік панельдер;
- қуаты 60 кВт жел генераторлары;
- сыйымдылығы 400 кВт*сағат аккумуляторлық жинағыштар;
- жүктемені және генерацияны бөлуді басқарудың зияткерлік блок.

1-кесте – Энергиямен жабдықтау тәсілдерін салыстырмалы талдау.

№	Параметр	Дизельдік жүйе	Күн жүйесі	Гибридік жүйе
1	Жылдық тұтыну, кВт*сағ.	292 000	292 000	292 000

2	Қажеттілікті қанағаттандыру, %	100	65	94
3	СО ₂ шығарындылары, тонна/жыл	~250	0	<30
4	Орташа жылдық шығындар, млн. тг.	19	12	9
5	Отынның сыртқы көздеріне тәуелділік	Жоғары	Төмен	Өте төмен
6	Энергиямен жабдықтаудың сенімділігі	Орташа	Төмен (түнгі уақытта)	Жоғары

Есептеу 800 кВт*сағат тәуліктік тұтынуға негізделген, бұл демографиялық және инфрақұрылымдық жағдайға ұқсас Қазақстан Республикасы мен Орталық Азияның ауылдық елді мекендері туралы деректермен расталады [11].

Қажеттіліктерді жабу, %.

Дизель – 100 %: отынды үздіксіз жеткізу жағдайында сұранысты толық қанағаттандыру.

Күн жүйесі – 65 %: Қазақстан жағдайында қуаты 100 кВт күн қондырғысының типтік жылдық өндірісі белгіленген қуаты 1 кВт-қа 1600-1900 кВт*сағат құрайды [12].

$$100 \text{ кВт} \times 1800 = 180\,000 \text{ кВт} \cdot \text{сағат} \approx 62-65 \%$$

Гибридік жүйе – 94 %: қуаты 60 кВт жел генераторларын және аккумуляторлық жүйені (400 кВт·сағ) қосқан кезде қажеттіліктерді жабу 90–95 %-ға жетуі мүмкін, бұл HOMERPro модельдеу нәтижелеріне сәйкес келеді [13].

СО₂ шығарындылары, т/жыл.

Дизель:

$$292\,000 \times 0,85 = 248\,200 \text{ кг} = 248,2 \text{ т СО}_2 \approx 250 \text{ т.}$$

Деректерге сәйкес 1 кВт*сағат 0,85 кг СО₂ мәні қабылданды [13].

Күн/гибридік: гибридік жүйедегі резервтік генерация (шамамен 6 %) жылына 30 т СО₂ кем қалдық шығарындыларға әкеледі.

Орташа жылдық құны, млн. теңге.

Дизель:

Отын, логистика, қызмет көрсету және амортизацияны қоса есептегенде 1 кВт сағаттың орташа құны 60-70 теңге құрайды (отын бағасы 300–350 теңге/л болғанда) [14].

$$292\,000 \times 65 = 18,98 \text{ млн. теңге.}$$

Күн жүйесі:

Жабдықтың құнын (100 кВт≈18 млн теңге.), қызмет ету мерзімін (20–25 жыл), техникалық қызмет көрсетуді және отынға жұмсалатын шығындардың жоқтығын ескере отырып, есептік құны 4,2 теңге/кВт·сағат құрайды [15].

292 000×4,2=12,26 млн. теңге.

Гибридті жүйе:

Жел генерациясы мен жинақтауыштарды ықпалдастыру кезінде, бірақ отынға шығынсыз өзіндік құн шамамен 3 тг/кВт*сағат құрайды (күрделі салымдар, сервис және резервтер ескерілген).

292 000×3,1≈9,1 млн. теңге.

Сыртқы отынға тәуелділік

Сапалы бағаланады:

Дизель-толық тәуелділік;

Күн-тек түнгі уақытта және бұлтты күндері;

Гибридті – резервтік дизель-генератордың жылдық генерациясының ең көп дегенде 5–6 %.

Энергиямен жабдықтаудың сенімділігі.

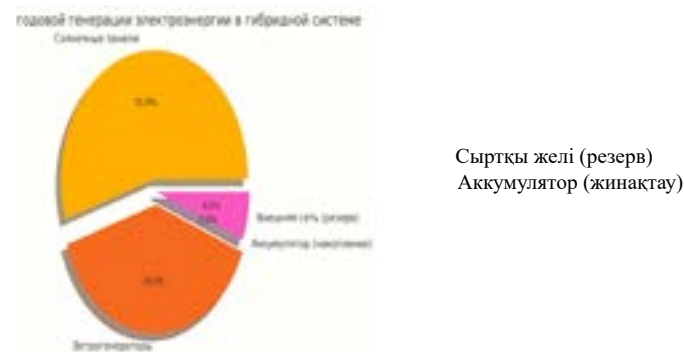
Генерация сипатын және жинақтауыштардың болуын ескере отырып:

Күн жүйесі – түнде және қыста үзілістер болуы мүмкін;

Гибридті жүйе – генерациялаудың графигі мен аккумуляторлардың арқасында жоғары сенімділік [16].

Осылайша, 1 кестеде көрсетілгендей, гибридтік жүйе моносистемалармен салыстырғанда энергиямен қамтамасыз етудің және орнықтылықтың жоғары көрсеткіштерін көрсетеді. Бірін-бірі толықтыратын екі энергия көзін – күн және жел көздерін біріктіру жүктеменің тәуліктік және маусымдық ауытқуларын біркелкі жабуға қол жеткізуге мүмкіндік береді. Күн панельдері күндізгі уақытта және жазғы кезеңде барынша өнімді қамтамасыз етеді, ал жел генерациясы түнгі уақытта және қыста тапшылықты өтейді.

3-суретте ұсынылатын гибридтік жүйеде жылдық генерацияны бөлу құрылымы берілген.



3-сурет – Ұсынылатын гибридтік жүйеде өндірілетін энергияның жылдық көлемін бөлу құрылымы.

Қажеттіліктердің жартысынан астамы күн энергиясының есебінен, шамамен 39% – жел энергиясының есебінен қанағаттандырылады, ал сыртқы желінің немесе резервтік генерацияның үлесі минимумға дейін төмендейді. Тербелістерді тегістеуді және энергиямен жабдықтаудың сенімділігін арттыруды қамтамасыз ететін аккумуляторлық жинақтағыштар да маңызды рөл атқарады. Оларды қолдану ең жоғары генерация кезеңінде өндірілетін артық энергияны тиімді пайдалануға және оны сұраныстың артуы немесе генерацияның төмендеуі кезінде пайдалануға мүмкіндік береді.

Жүргізілген зерттеу нәтижелері бойынша мынадай нәтижелер алынды. Дизельдік жүйелерден жаңартылатын энергия көздері базасындағы гибридтік қондырғыларға көшу шағын елді мекендерді тұрақты және автономды энергиямен жабдықтауға маңызды қадам болып табылады. Қазақстан Республикасындағы халықтың қашықтығы мен төмен тығыздығы жағдайында мұндай аумақтар орталықтандырылған электр желілеріне шектеулі қолжетімділікпен және дәстүрлі энергиямен жабдықтау шығындарының жоғары деңгейімен жиі кездеседі. Аккумуляторлармен интеграцияланған гибридтік күн-жел қондырғылары техникалық, сондай-ақ әлеуметтік-экономикалық артықшылықтарға ие тиімді баламаға айналууда.

Гибридтік жүйелерді енгізудің анағұрлым айқын нәтижелерінің бірі парниктік газдар шығарындыларын айтарлықтай төмендету болып табылады. Халықаралық энергетикалық агенттіктің (IEA) мәліметтеріне сәйкес, дизель генераторлары өндірілген әрбір киловатт-сағатқа шамамен 0,8-0,9 кг СО₂ шығарады. Осылайша, 292000 кВт*сағат көлеміндегі шағын ауылдың жылдық энергия тұтынуы жылына шамамен 250 тонна СО₂ шығаруға әкеледі. Резервтік

дизельдік генераторды (жалпы көлемнің 5-6 %-нан аспайтын) барынша аз пайдаланумен күн және жел генерациясының есебінен қажеттіліктерді жабуды қамтамасыз ететін гибридік жүйеге көшу бұл көрсеткіштерді сегіз еседен астам қысқартуға мүмкіндік береді. Бұл жергілікті энергетикалық жүйелерді декарбонизациялаудың қазіргі заманғы халықаралық нормаларына және Қазақстан Республикасы 2016 жылдан бастап қатысатын климат жөніндегі Париж келісімінің мақсаттарына сәйкес келеді [17].

Экологиялық пайдадан басқа, гибридік шешімдердің ұзақ мерзімді перспективадағы экономикалық тиімділігі маңызды аспект болып табылады. Дизель генерациясының құны отын шығындарын ғана емес, тасымалдау, техникалық қызмет көрсету, тозған компоненттерді ауыстыру шығындарын, сондай-ақ алыс өңірлерге жеткізумен байланысты логистикалық тәуекелдерді қамтиды. БҰҰ Даму бағдарламасының есебінде (UNDP Kazakhstan, 2023) қол жетімділігі қиын жерлерге отынның бір литрін жеткізу бағасы оның номиналдық құнынан екі және одан да көп есе асуы мүмкін екені атап өтілген. Бұл отынның әлемдік бағасының өсуі немесе логистикадағы іркілістер сияқты сыртқы күйзелістер жағдайында дәстүрлі дизельдік жүйелерді экономикалық тұрғыдан орынсыз және тұрақсыз етеді. Бұдан айырмашылығы, гибридік жүйелер едәуір бастапқы салымдарды талап етеді, бірақ отынға тәуелділіктің болмауы және техникалық қызмет көрсетудің азаюы есебінен жабдықтың өмірлік циклі (15-25 жыл) бойы пайдалану шығындарының тұрақты төмендеуін қамтамасыз етеді.

Электр энергиясын жергілікті өндіру арқылы Қазақстан Республикасында энергетикалық автономияны ұлғайту, әсіресе, әлеуметтік инфрақұрылым объектілерінің контекстінде маңызды. Мектептер, медициналық пункттер, сумен жабдықтаудың сорғы станциялары, ауылдық жерлердегі байланыс және жарықтандыру пункттері тұрақты электрмен жабдықтауға өте тәуелді. Гибридік қондырғыларды енгізу энергия жинақтағыштарды және жүктемелерді интеллектуалды басқаруды пайдалана отырып, автономды режимде жұмыс істеу мүмкіндігінің арқасында сыртқы электр желісі болмаған кезде де сенімді энергия беруге кепілдік беруге мүмкіндік береді. Мұндай шешімдер Орталық Азия мен Африканың бірқатар өңірлерінде табысты қолданылуда, онда орталықтандырылған энергия жүйелері елеулі аумақтарды қамтымайды [18].

Техникалық және экологиялық артықшылықтардан басқа гибридік жүйелер ауылдық елді мекендердің әлеуметтік-экономикалық дамуына елеулі әсер етеді. Мұндай жүйелерді орнату және оларға қызмет көрсету жаңа жұмыс орындарын құра отырып және өңірде адами капиталдың дамуына ықпал ете отырып, жергілікті мамандарды оқытуды талап етеді. 2023 жылы IRENA жүргізген зерттеу деректері бойынша, орнатылған жаңартылатын

энергия көздерінің әрбір 100 кВт-қа мониторинг, қызмет көрсету және жүйелерді пайдалануға байланысты кемінде 2-3 тұрақты жұмыс орны тиесілі. Ауылдық елді мекендерден халықтың көші-қон ағыны жағдайында мұндай жобалар, әсіресе, егер олар білім беру бағдарламаларымен және кәсіби қайта даярлықпен сүйемелденсе, жастарды ұстап тұруға ынталандыра алады [19].

Мәдени аспект да маңызды болып табылады: жаңартылатын энергия көздерін енгізу ауылдық жердегі халық арасында орнықты экологиялық мәдениеттің қалыптасуына ықпал етеді. Тұтыну моделінен қатысу моделіне көшу және жергілікті энергиямен жабдықтау үшін жауапкершілік шамасына қарай ресурстарды ұтымды тұтынуға, қалдықтарды қайта өңдеуге және қоршаған ортаны қорғауға қатысты ұғыну ұлғаяды. Қазақстан Республикасының Жамбыл және Маңғыстау облыстарында пилоттық жобаларды іске асыру шеңберінде жергілікті тұрғындардың энергия ресурстарын басқаруға, оның ішінде қоғамдық талқылауларға қатысуға, генераторларды орналастыру және олардың пайдаланылуын бақылау туралы шешім қабылдауға тартылуын арттыру байқалды.

Бұдан басқа, гибридік жүйелер жоғары икемділікке және масштабталуға ие, бұл тұтынудың ұлғаюына байланысты олардың қуатын кезең-кезеңмен кеңейтуге мүмкіндік береді. Бұл әсіресе ауыл шаруашылығын біртіндеп цифрландыру, электрлендірілген тұрмыстық аспаптар санының өсуі және ресурстарды «ақылды» басқару технологияларын енгізу тұрғысынан өзекті. Қатаң шектелген дизельдік қондырғылардан айырмашылығы, гибридік ЖЭК-жүйелері инфрақұрылымды едәуір қайта құрусыз өзгермелі қажеттіліктерге оңай бейімделуі мүмкін.

Академиялық зерттеулер күн және жел генерациясы бір-бірінің кемшіліктерін өтейтін құрама жүйелер өмірлік цикл тұрғысынан неғұрлым тұрақты болып табылатынын атап көрсетеді. Мысалы, түнгі және қысқы уақытта күн генерациясы төмендеген кезде жел қондырғыларының үлесі артады, әсіресе ауа маусымдық айналымы бар өңірлерде. Екінші жағынан, жазғы күндерде жел белсенділігі төмендеуі мүмкін, бірақ бұл ретте күн панельдерінің өндірісі ұлғаяды. Осылайша, осы екі көзді аккумуляторлармен бірге пайдалану жыл бойы сенімділік пен теңгерімді энергия теңгерімінің жоғары дәрежесіне қол жеткізуге мүмкіндік береді.

Халықаралық деңгейде мұндай шешімдер шалғайдағы және ауылдық аумақтарды тұрақты дамытудың негізгі компоненті ретінде қарастырылады. Жаңартылатын энергия көздері жөніндегі халықаралық агенттіктің (IRENA, 2023) баяндамасына сәйкес 2030 жылға қарай дамушы елдердегі барлық жаңа орталықсыздандырылған электрмен жабдықтау объектілерінің 60% гибридік ЖЭК-жүйелерге негізделетін болады. Әсіресе оңтүстік, орталық және батыс өңірлерде күн және жел энергиясының бай әлеуетіне ие Қазақстан

Республикасының осындай шешімдерді шағын қоғамдастық деңгейінде кең ауқымды енгізу үшін барлық алғышарттары бар [20].

Демек, гибридітік жел-күн жүйелері көміртегі ізін қысқартуға және ресурстарды үнемдеуге ықпал етіп қана қоймай, Қазақстан Республикасында орнықты аумақтық даму құралына айналады. Олар орнықты болашаққа ұмтылатын Қазақстан Республикасы мен басқа да елдердің ауылдық және шалғай аудандарының энергетикалық ландшафтын трансформациялаудың перспективалық жолы болып табылатын экологиялық тиімділікті, әлеуметтік маңыздылықты және экономикалық мақсаттылықты біріктіреді.

Бұл жұмыс Қазақстан Республикасы Ғылым және жоғары білім министрлігінің Ғылым комитетінен гранттық қаржыландыру шеңберінде қаржыландырылатын ИРН АР19677354 жобасын іске асыру барысында алынған нәтиже болып табылады.

Қорытынды

Ғылыми мақалада жүргізілген зерттеулер гибридітік жел-күн энергетикалық жүйелерінің энергия тиімділігін арттыру және шағын елді мекендерді, әсіресе отын жеткізудің тұрақсыздығы бар орталықтандырылған желілерден алыс аудандарды тұрақты энергиямен қамтамасыз ету үшін айтарлықтай әлеуетке ие екенін көрсетеді. Салыстыру барысында Қазақстан Республикасында пайдалану үшін әртүрлі сценарийлер (дәстүрлі дизельдік генерация, автономды күн жүйесі және гибридітік қондырғы) гибридітік тәсілдің техникалық және әлеуметтік-экономикалық артықшылықтары атап өтілді.

Ең алдымен, гибридітік жүйелер парниктік газдар шығарындыларын едәуір төмендетуге ықпал етеді. Модельдеу гибридітік жүйені енгізу дизельдік генерациямен салыстырғанда 2 жылдық CO₂ эмиссиясын сегіз еседен астам қысқартуы мүмкін екенін көрсетті. Бұл Париж келісімінің ережелерін іске асыруды қоса алғанда, халықаралық климаттық міндеттемелер тұрғысынан, сондай-ақ Қазақстан Республикасының ауылдық өңірлеріндегі экологиялық қауіпсіздік және қоршаған ортаны қорғау тұрғысынан ерекше маңызды болып отыр.

Екіншіден, гибридітік қондырғылар ұзақ мерзімді перспективада жоғары экономикалық тиімділікті көрсетеді. Бастапқы салымдар айтарлықтай болғанымен, мұндай жүйелер отын сатып алу қажеттілігінің болмауы, жабдықтардың тозуын төмендету және қызмет көрсету шығындарын барынша азайту есебінен пайдалану шығындарын тұрақты төмендетуді қамтамасыз етеді. Әлемдегі көмірсутек отыны бағасының өсуі мен шалғай аудандардағы логистиканың күрделілігі жағдайында гибридітік шешімдер қаржылық тұрғыдан тұрақты балама болып табылады.

Үшінші маңызды қорытынды гибридітік модельді пайдалану кезінде энергиямен жабдықтаудың жоғары сенімділігін растау болды. Күн және жел

қондырғыларының бірін-бірі толықтыратын жұмыс режимдері, сондай-ақ аккумуляторлық жүйелердің болуы есебінен энергия тұтынудың тәуліктік және маусымдық ауытқуларын барынша теңгерімді жабуға қол жеткізіледі. Бұл әсіресе электр энергиясын үздіксіз беру қажет мектептер, медициналық пункттер және сумен жабдықтау жүйелері сияқты әлеуметтік маңызы бар ауылдық объектілер үшін өзекті.

Қосымша, гибридітік ЖЭК-жүйелерді дамыту жаңа әлеуметтік-экономикалық әсерлердің пайда болуына ықпал етеді. Мұндай технологияларды енгізу жергілікті жұмыспен қамтуды ынталандырады, ауыл халқының біліктілігін арттырады және тұрақты энергетика саласындағы білім беру бағдарламаларын іске асыру үшін қолайлы жағдайлар жасайды. Осының бәрі жергілікті ауылдық қоғамдастық деңгейінде энергетикалық сауаттылық, тартымдылық және жауапкершілік деңгейін арттыруға негіз болады.

Гибридітік жүйелердің бейімделуі мен ауқымдылығына ерекше назар аударған жөн. Олардың модульдік құрылымы қазіргі қажеттіліктерге бейімделіп қана қоймай, шағын ауылдық елді мекенде энергия тұтыну артқан сайын икемді түрде кеңейтуге мүмкіндік береді. Бұл гибридітік ЖЭК-шешімдерді Қазақстан Республикасының ауылдық аудандарындағы энергетикалық жүйелерді кезең-кезеңмен жаңғырту үшін стратегиялық перспективалы етеді.

Жоғарыда баяндалғанның негізінде гибридітік жел-күн жүйелеріне көшу тек технологиялық жаңартуды ғана емес, сонымен қатар Қазақстан Республикасының ауылдық аумақтарын орнықты дамыту жолындағы маңызды кезеңді білдіреді. Бұл жүйелер заманауи энергетикалық трансформацияның негізгі аспектілерін - экологиялық жауапкершілікті, технологиялық сенімділікті және әлеуметтік маңыздылықты біріктіреді, болашаққа бағдарланған энергиямен жабдықтаудың тұрақты моделін қалыптастырады.

ПАЙДАЛАНЫЛҒАН ДЕРЕКТЕР ТІЗІМІ

1 National Renewable Energy Laboratory (NREL). HOMER V.2 software – Golden, USA, – 2025. – [Электронды ресурс]. – URL: – <http://www.nrel.gov/homer>.

2 U. S. Energy Information Administration (EIA). Global renewable electricity generation review. – 2010–2020 – Washington, USA, – 2024. – [Электронды ресурс]. – URL: – <https://www.eia.gov>.

3 Росиньска, В., Юраш, Дж., Пшестрзельска, К. и др. Волновое воздействие изменения климата на системы водоснабжения и взаимосвязь воды и энергии – обзор // Водный ресурс. – 2024. – Т. 32. – № 100266.

- 4 **Рамос, Х. М., Синтонг, Дж. Э., Курики, А.** Оптимальная интеграция гидроаккумулирующей энергии в переходный период энергетики // Возобновляемая энергия. – 2024. – Т. 221. – № 119732.
- 5 IRENA. Global market outlook for hybrid renewable energy systems. – Abu Dhabi, – 2023. – [Электронды ресурс]. – URL : – <https://www.irena.org>.
- 6 Ministerstvo energetiki Indii. Nacionalnii plan perehoda na vozobnovlyаемuyu energetiku do 2030 goda. – Nyu-Deli, 2022.
- 7 White House (USA). «Green Deal» initiative Washington, USA. – 2021. – [Электронды ресурс]. – URL: – <https://www.whitehouse.gov>.
- 8 **Akrofi, M. M., Okitasari, M.** Integrating solar energy in low-carbon urban planning: review // Urban Governance. – 2022. – Vol. 2. – P. 157–172.
- 9 **Khalid, M.** Smart grids and renewable energy integration: challenges and opportunities. Energy Strategy Reviews. – 2024. Vol. 51. No. 101299.
- 10 **Kalautit, K., Johnston, K.** Review of small-scale wind power technologies for buildings. Energy Convers. Manag. X. – 2023. – Vol. 20. – No. 100457.
- 11 UNDP Kazakhstan. Analiz ustoichivosti i energeticheskoi dostupnosti v selskih regionah Kazakhstana. – Astana: PROON, – 2023. – [Электронды ресурс]. – URL: – <https://www.kz.undp.org>.
- 12 KazHydromet. Солнечная и ветровая активность по регионам Казахстана. – 2023. – [Электронды ресурс]. – URL: – <https://www.kazhydromet.kz>.
- 13 **Tatar, S. M., Aydin, E.** Проектирование микросетей с ВИЭ в условиях неопределённости // Sustainable Energy Grids and Networks. – 2024. – Т. 37. – № 101233.
- 14 UNFCCC. Parijskoe soglasenie: status realizacii v Kazakhstane. – 2024. – [Электронды ресурс]. – URL: – <https://unfccc.int>.
- 15 IEA. Globalnie vibrosi CO₂ i klimaticheskie celi. – Mejdunarodnoe energeticheskoe agentstvo. – 2023. – [Электронды ресурс]. – URL: – <https://www.iea.org>.
- 16 **Olateju, B., Mond, J., Kumar, A.** Hydrogen production from wind energy. Applied Energy. – 2014. – Vol. 118. – P. 48–56.
- 17 **Perez-Collazo, C., Greaves, D., Iglesias, G.** Combined wave and offshore wind energy. Renewable and Sustainable Energy Reviews, – 2015. – Vol. 42. – P. 141–153.
- 18 KazHydromet. Данные по инсоляции в Центральной Азии. – 2023. – [Электронды ресурс]. – URL: – <https://www.kazhydromet.kz>.
- 19 U.S. Environmental Protection Agency (EPA). Emissions & Generation Resource Integrated Database (eGRID). – 2022.
- 20 IRENA. Renewable power generation costs in 2022. – Abu Dhabi, 2023.

REFERENCES

- 1 National Renewable Energy Laboratory (NREL). HOMER V.2 software. Golden, USA. – 2025. [Electronic resource]. – URL: – <http://www.nrel.gov/homer>.
- 2 U. S. Energy Information Administration (EIA). Global renewable electricity generation review, 2010–2020. [Electronic resource]. – URL: – <https://www.eia.gov>.
- 3 **Rosinska, V., Yurash, J., Pshestrzhelska, K. et al.** Volnovoe vozdeistvie izmeneniya klimata na sistemy vodosnabzheniya i vzaimosvyaz vody i energii – obzor [Wave impact of climate change on water supply systems and the water-energy nexus – review] // Vodnyi resurs. – 2024. – Vol. 32. – No. 100266.
- 4 **Ramos, H. M., Syntong, J. E., Kuriki, A.** Optimal'naya integratsiya gidroakkumuliruyushchei energii v perekhodnyi period energetiki [Optimal integration of pumped hydro storage in energy transition]. Renewable Energy. 2024. – Vol. 221. – No. 119732.
- 5 IRENA. Global market outlook for hybrid renewable energy systems. Abu Dhabi, – 2023. [Electronic resource]. – URL: – <https://www.irena.org> (Accessed 15.04.2025).
- 6 Ministry of Energy of India. National plan for transition to renewable energy until 2030, – New Delhi, – 2022.
- 7 White House (USA). «Green Deal initiative». Washington, 2021. [Electronic resource]. – URL: – <https://www.whitehouse.gov> (Accessed 15.04.2025).
- 8 **Akrofi, M. M., Okitasari, M.** Integrating solar energy in low-carbon urban planning: review. Urban Governance. – 2022. – Vol. 2. – P. 157–172.
- 9 **Khalid, M.** Smart grids and renewable energy integration: challenges and opportunities. Energy Strategy Reviews. – 2024. – Vol. 51. – No. 101299.
- 10 **Kalautit, K., Johnston, K.** Review of small-scale wind power technologies for buildings. Energy Convers. Manag. X, – 2023. – Vol. 20. – No. 100457.
- 11 UNDP Kazakhstan. Resilience and energy access in rural regions. – Astana, – 2023. [Electronic resource]. – URL: – <https://www.kz.undp.org>.
- 12 KazHydromet. Solnechnaya i vetrovaya aktivnost' po regionam Kazakhstana [Solar and wind activity by regions of Kazakhstan]. – 2023. – URL: – <https://www.kazhydromet.kz>.
- 13 **Tatar, S.M., Aydin, E.** Proektirovanie mikrosetei s VIE v usloviyakh neopredelennosti [Designing renewable-based microgrids under uncertainty]. Sustainable Energy Grids and Networks, – 2024. – Vol. 37. No. 101233.
- 14 UNFCCC. Paris Agreement: status of implementation in Kazakhstan. 2024. [Electronic resource]. – URL: – <https://unfccc.int>.
- 15 IEA. Global CO₂ emissions and climate goals. – Paris, – 2023. [Electronic resource]. – URL: – <https://www.iea.org>.

16 **Olateju, B., Mond, J., Kumar, A.** Hydrogen production from wind energy // *Applied Energy*. – 2014. – Vol. 118. – P. 48–56.

17 **Perez-Collazo, C., Greaves, D., Iglesias, G.** Combined wave and offshore wind energy. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. – 2015. – Vol. 42. – P. 141–153.

18 KazHydromet. Dannye po insolyatsii v Tsentral'noi Azii [Insolation data in Central Asia]. 2023. [Electronic resource]. – URL: <https://www.kazhydromet.kz>.

19 U. S. Environmental Protection Agency (EPA). // Emissions & Generation Resource Integrated Database (eGRID). – 2022.

20 IRENA. Renewable power generation costs in 2022. – Abu Dhabi. – 2023.

30.05.25 ж. баспаға түсті.

05.11.25 ж. түзетулерімен түсті.

05.12.25 ж. басып шығаруға қабылданды.

*С. С. Исенов¹, Қ. Б. Байбейсенова², Г. С. Нурмаганбетова³

^{1,2,3}Қазақстан Республикасының аграрлық-техникалық ғылымдар университеті

имени С. Сейфуллина, Республика Қазақстан, г. Астана.

Поступило в редакцию 30.05.25.

Поступило с исправлениями 05.11.25.

Принято в печать 05.12.25.

ЭНЕРГОЭФФЕКТИВНОСТЬ ЭНЕРГОСНАБЖЕНИЯ МАЛЫХ НАСЕЛЁННЫХ ПУНКТОВ: ГИБРИДНЫЕ ВЕТРО-СОЛНЕЧНЫЕ УСТАНОВКИ

В настоящее время, в условиях глобального перехода к устойчивой энергетике и истощения ископаемых ресурсов, растёт потребность в эффективных и стабильных решениях для надёжного и экологически чистого электроснабжения малых сельских населённых пунктов. В таких условиях одним из наиболее перспективных направлений является использование гибридных систем, объединяющих солнечную и ветровую генерацию. Подобные установки обеспечивают круглосуточное и бесперебойное энергоснабжение, снижают зависимость от традиционных видов топлива, уменьшают выбросы парниковых газов и сокращают затраты на электроэнергию. В рамках исследования рассматриваются преимущества гибридных ветро-солнечных установок, их социально-экономическое значение для удалённых сельских территорий, а также экологическая и финансовая эффективность. Кроме того, определяется роль

современных технологий управления и накопления энергии в контексте устойчивого развития. Полученные результаты подтверждают эффективность внедрения гибридных систем как основы устойчивого развития сельских регионов Казахстана. Такой подход способствует модернизации сельской инфраструктуры, росту занятости и укреплению социальной стабильности местных сообществ. Результаты исследования могут служить научной основой для формирования устойчивого энергетического будущего нашей страны.

Ключевые слова: гибридная энергетика, возобновляемые источники энергии, ветро-солнечные установки, энергоэффективность, малые населенные пункты, устойчивое развитие, децентрализованное электроснабжение.

*S. S. Issenov¹, K. B. Baibeisenova², G. S. Nurmaganbetova³

^{1,2,3}Kazakh Agrotechnical Research University named after S. Seifullin,

Republic of Kazakhstan, Astana.

Received 30.05.25.

Received in revised form 05.11.25.

Accepted for publication 05.12.25.

ENERGY SUPPLY EFFICIENCY OF SMALL SETTLEMENTS: HYBRID WIND-SOLAR SYSTEMS

At present, amid the global transition to sustainable energy and the depletion of fossil resources, there is a growing need for efficient and reliable solutions to ensure stable and environmentally friendly power supply for small rural settlements. Under these conditions, one of the most promising directions is the use of hybrid systems that combine solar and wind generation. Such installations provide round-the-clock and uninterrupted energy supply, reduce dependence on traditional fuel types, lower greenhouse gas emissions, and decrease electricity costs. This study examines the advantages of hybrid wind-solar systems, their socio-economic significance for remote rural areas, as well as their environmental and financial efficiency. In addition, it defines the role of modern energy management and storage technologies in the context of sustainable development. The results confirm the effectiveness of implementing hybrid systems as a foundation for the sustainable development of rural regions in Kazakhstan. This approach contributes to the modernization of rural infrastructure, job creation, and strengthening the social stability of local

communities. The findings of the research can serve as a scientific basis for shaping the sustainable energy future of our country.

Keywords: hybrid energy, renewable energy sources, wind-solar systems, energy efficiency, small settlements, sustainable development, decentralized power supply.

FTAMP 44.31.30

<https://doi.org/10.48081/AYOC8161>

**М. С. Канапинов¹, *А. Т. Байдилдина², Г. С. Дуйсембаева³,
А. Ш. Агажанов⁴, Д. А. Самошкин⁵**

^{1,2,3}Д. Серікбаев атындағы Шығыс Қазақстан техникалық университеті, Қазақстан Республикасы, Өскемен қ.;

⁴Новосібір мемлекеттік университеті, Ресей Федерациясы, Новосібір қ.;

⁵С. С. Кутателадзе атындағы Жылуфизика институты, Ресей Федерациясы, Новосібір қ.

¹ORCID: <https://orcid.org/0009-0002-6249-2373>

²ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-3793-5817>

³ORCID: <https://orcid.org/0009-0003-5059-8223>

⁴ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-0461-7211>

⁵ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-7074-7762>

*e-mail: azhaparova@edu.ektu.kz

INCONEL 617 ҚОРЫТПАСЫНЫҢ ЖЫЛУӨТКІЗГІШТІГІН ЖӘНЕ ТЕМПЕРАТУРА ӨТКІЗГІШТІГІН ЗЕРТТЕУ

Мақалада зерттеу жұмыстарында келешегі бар және ең тиімді қорытпалардың бірі Inconel 617 қорытпасы қарастырылған. Яғни, оның құрылымдық-химиялық құрамында хром, никель, кобальт, молибден бар. Мұндай құрамнан тұратын қорытпа агрессивті ортада материалға жоғары температурада ыстыққа төзімділік қасиет бере алады. Қорытпаның көптеген физика-механикалық қасиеттері зерттелгенімен, жұмыс процесінде және металдың кеңеюіне әсер етудегі маңызды сипаттамаларының бірі болып табылатын температура өткізгіштік және жылу өткізгіштік қасиеті зерттелмеген, сол себептен берілген зерттеу жұмысы өзекті болып табылады. Өлшеу жұмыстары LFA-427 қондырғысында лазерлік жарқыл әдісімен 300 ден 1475 К дейінгі температура диапазонында зертханалық қондырғылар көмегімен жүргізілді. Алынған мәліметтер температура өткізгіштігі үшін температураның 2-4 % пен 3-5 % қателіктері бойынша бағаланды. Зерттеулер негізінде материалдың қасиеттерінің температураға тәуелділігіне жуықтайтын теңдеулер алынды және анықтамалық

мәндер бойынша кесте құрастырылды. Бұл кесте әр түрлі мәселелерді шешуде және әр түрлі инженерлік зерттеулер мен ғылыми талдауларда қолдануға қажет болатын анықтамалық мәндер болып табылады. Мақалада өндірістік жылуалмастырғыш қондырғылар жоғары критикалық параметрлерде және агрессивті ортада жұмыс істегендіктен қондырғыға тұтастай әсер ететіні дәлелденген.

Кілтті сөздер: Inconel 617 қорытпасы, температураөткізгіштік, жылуөткізгіштік, лазерлік жарқыл әдісі, жылу энергетика.

Кіріспе

Қазіргі уақытта агрессивті ортада жұмыс істеуге жарамды, жоғары температуралы ортада ыстыққа төзімді және беріктік қасиеті жоғары, сонымен қатар тот басу процесіне төзімділігі бар болатын қорытпаларға сұраныс артып отыр. Осындай материалдардың бірі Inconel 617 қорытпасы, композицияның құрамында хром, никель, кобальт, молибден бар. Яғни, бұл материалдың құрылымдық бөлігінен бастап жабдықтың негізгі элементіне дейін өнеркәсіптің әртүрлі салаларында қонданысқа енгізуге мүмкіндік туғызады.

Алайда, әдебиеттік шолу жасай отырып зерттеу жұмыстарын жүргізгенде, жылуөткізгіштік пен температураөткізгіштігін өлшеуге арналған бірнеше эксперименттік жұмыстардың ұсынылғанын ескеру қажет. Ол жұмыстардың нәтижелері жоғары температурада бір-бірінен ерекшеленеді, жалпы өлшеу қателіктерінен асып түсетінін байқауға болады.

Сондықтан берілген жұмысты зерттеудің маңыздылығы дәлелденген болып табылады, өйткені никель қорытпаларының біршамасы құйманың микроқұрылымына және құрылымына байланысты болады. Ал ол жоғары критикалық қысым мен температуралы агрессивті ортада қолданған кезде жылуөткізгіштікке және жылу диффузиясына әсер етеді. Сонымен қатар келесі жайтты ескеру қажет, басқа ғалымдардың зерттеу жұмыстарында жоғары температурада қорытпа қорының ескіруі кезінде жылуфизикалық қасиеттері өзгеріссіз қалған. Жоғарыда сипатталған негіздемені ала отыра, жылуөткізгіштік пен температураөткізгіштік соңына дейін зерттелмегенін белгілі. Сондықтан, зерттеудің мақсаты 1475 К дейінгі жоғары температурада қорытпаның жылуфизикалық қасиетін зерттеу болып табылады. Яғни, өндірістік жылуалмастырғыш қондырғылар жоғары критикалық параметрлерде және агрессивті ортада жұмыс істегендіктен қондырғыға тұтастай әсер етеді.

Материалдар мен әдістері

Ұсынылған жұмыста қорытпаның температуралық өткізгіштігін өлшеу лазерлік жарқыл әдісі арқылы [1], NETZSCH фирмасының LFA-427 бірегей эксперименттік стендінде жүргізілді. Үлгінің диаметрі 12,6 мм және

қалыңдығы 2,4 мм цилиндр тәрізді, ұштары жазық параллель тегістелген. Тәжірибелер 300-1475 К температура аралығында статикалық инертті атмосферада (Ar 99,992 айн. %) жүргізілді. Өлшеу процессінде үлгінің төменгі беті Nd: YAG лазерінен қысқа лазерлік импульспен (1,064 мкм) ұзындығы 0,8 мс, энергиясы 10 Дж дейін сәулеленеді. Жоғарғы бет температурасының өзгеруі сұйық азотпен салқындатылған ИК детекторымен тіркеліп жазылады. Температураөткізгіштік а шамасы жұмыста келтірілген есептеу моделі бойынша сәулелену түріндегі жылу шығынын ескере отырып, үлгінің жоғарғы бетін қыздырудан алынған термограммасы бойынша анықталды [2]. Лазерлік импульстің соңғы ұзақтығына және оның нақты формасына түзету енгізілді [3]. Inconel 617 үшін жылу кеңеюін есепке алу үшін салыстырмалы ұзарту мәндері ϵ [4]. Берілген температурада а-ның өлшеу лазердің бірнеше «ату» сериясында үлгіні термостаттаудан кейін жүзеге асырылады. а анықтамасының жалпы қателігі 300 К кезінде 2 % және 1500 К кезінде 4 % құрайды, яғни жоғары таза мыс пен молибденнен жасалған стандартты қатты үлгілерді қолдана отырып өлшеу нәтижелері анықталды.

Қорытпаның жылу өткізгіштігі λ келесі формула бойынша есептелді

$$\lambda = \alpha \cdot \rho \cdot c_p \quad (1)$$

мұндағы ρ – тығыздық, c_p – меншікті массалық жылу сыйымдылығы. Берілген температурадағы $\rho(T)$ мәні бөлме температурасындағы қорытпа тығыздығының ρ_0 мәні арқылы болды және әдеби деректерді қолдану $\epsilon(T)$ [4] арақатынасы бойынша

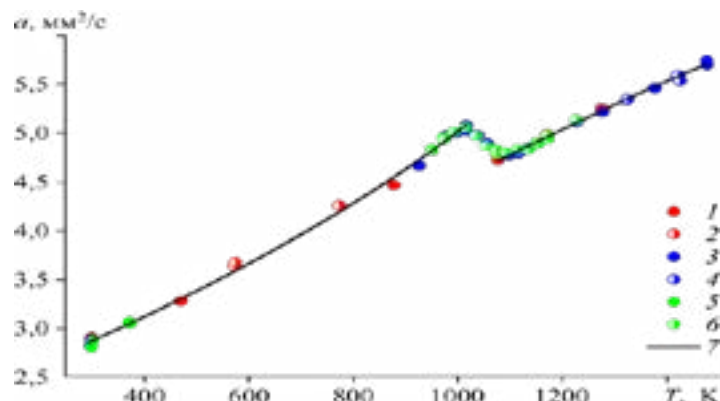
$$\rho(T) = \frac{\rho_0}{(1 + \epsilon(T))} \quad (2)$$

ρ_0 шамасы Inconel 617 үлгісінің массасы мен геометриялық өлшемдерін өлшеу нәтижелері бойынша 0,5 %-дан аспайтын қателікпен анықталды және $\rho_0 = 8,262 \text{ г/см}^3$ бағаны құрады. c_p бойынша деректер [1] алынған, онда қорытпаның жылу сыйымдылығы 2–4 % белгісіздігі бар дифференциалды сканерлеу калориметриясы әдісімен өлшенді. ρ және c_p белгісіздіктерін ескере отырып, есептелген мәндердің қателігі λ температураға байланысты 3–5%-ға бағаланады.

Нәтижелер және талқылау

Inconel 617 қорытпасының температураөткізгіштігін өлшеу бойынша эксперименталды зерттеу өткізу барысында лазерлік жарқыл әдісі арқылы зерттеудің қортындысы алынды. Үш тізбекті 300–1475 К температура

интервалында қыздыру-салқындату термиялық циклы арқылы алынған зерттеу қорытындысы 1 суретте көрсетілген.



1-сурет – Inconel 617 қорпасының температураөткізгіштігі. Қыздыру және салқындату бойынша алынған мәліметтер бірінші (1,2), екінші (3,4) және үшінші (5,6) эксперименттерде; 7- 3 және 4 теңдеулер бойынша аппроксимация.

Бірінші суретте зерттеу қорытындысы бойынша температураға тәуелді температураөткізгіштіктің үш эксперименттік графигі берілген. Тәуелділік эксперименттерін жүргізу барысында графиктен 1015–1076 К интервалында қисықтың сынуы байқалады, ол қорытпа материалын алуда фазалық өзгерістердің әсер етуін куәландырады. Inconel 617 [5] қорытпасына әдебиеттік шолу және термиялық анализ жүргізуге әсер еткенде, келесі гипотезаны ұсынуға болады. Фазалық өзгеру процессінде берілген анамалыя температура бойынша М23С6, мұнда Cr, Fe немесе Mo түрінде корбидті өзгерту процесіне сәйкес келеді. Inconel 718 [6] қорытпасында температураөткізгіштік қисығында өзгерістердің байқалуы тіркелді. Сондықтан нақты деректерді алу үшін ең кіші квадраттар әдісімен салыстырмалы математикалық анализ жүргізу керек деп шешілді. Деректерді жуықтау осылайша сандық сипаттамаларды зерттеу және алынған мәліметтердің сапалы қасиеттерін қарастыруға негізделген.

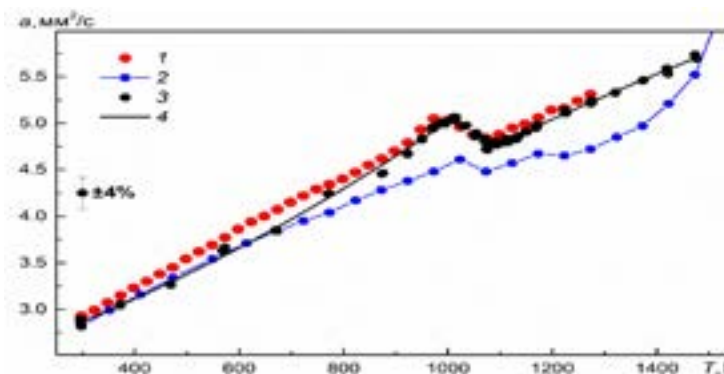
Мәндерді өлшеу бойынша деректерді жуықтау бізге келесі өрнектерді ұсынды:

$$\alpha(T) = 2,280 + 1,642 \cdot 10^{-3}T + 1,1 \cdot 10^{-6}T^2, \quad 300 \leq T \leq 1015 \text{ К.} \quad (3)$$

$$\alpha(T) = 1,358 + 9,610 \cdot 10^{-3}T - 4,5 \cdot 10^{-7}T^2, \quad 1076 \leq T \leq 1475 \text{ К.} \quad (4)$$

мұндағы α өлшем бірлігі мм²/с. Жүргізілген есептеулер барысында эксперименттік нүктелердің өрнектен орта квадраттық ауытқуы 1,1 және 0,4 % пайыздан артатыны белгілі болды.

Осылайша, алынған зерттеулер температураөткізгіштіктің өзгеруі көрсетілген фазалық түрлендіру аймағынан тыс орналысқанын жылуөткізгіштік бойынша эксперименттер көрсетті.

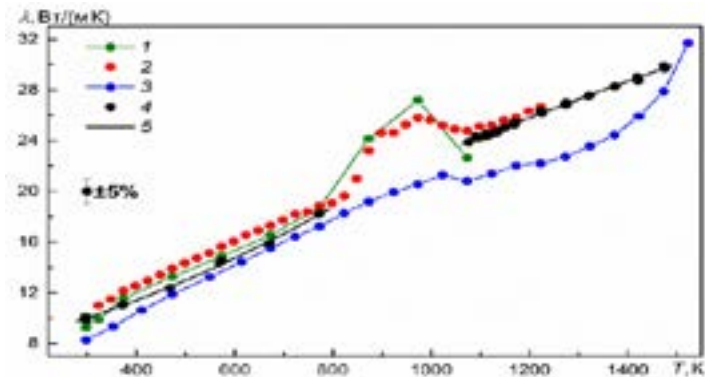


2-сурет – Inconel 617 қорпасының температураөткізгіштігі. [2] (1), [3] (2) жұмыстарының және осы зерттеудің мәндері (3), 4 – 3 және 4 теңдеулер бойынша аппроксимация.

Екінші суретте температураөткізгіштік (α) бойынша жүргізілген зерттеулер мен әдебиеттік шолу [5; 7] нәтижелер бойынша салыстыру берілген. Әдебиеттік шолудағы зерттеу жұмыстарында біздің зерттеген жұмыстағы сияқты лазерлік жарқыл әдісі арқылы температураөткізгіштікті өлшеу жұмыстары жүргізілген. Эксперименттерді [7] жүргізу барысында төрт қорытпа зерттелді. Ол қорытпалардың құрамдары және термиялық өңделуі әр түрлі. Бұл ретте температураөткізгіштік бойынша деректер барлық төрт үлгі үшін 1273 К дейін барлық зерттелген интервалда 3 % аралығында жүргізілген.

Графикте салыстыру жұмыстары үшін [7] нәтижесі ретінде, дәнекерлеу сымынан металды балқыту жолымен өндірілген үлгі алынып отыр. Келесі [5] жұмыста Inconel 617 үлгісі алдын ала 1473 К температурада сумен қатайтылды. Одан кейін қорытпа құрылымында әр түрлі ұсақ дисперсті фазалар қалыптастыру мақсатында 973 К температурада 1000 сағат аралығында жоғары таза аргон ағынында көнеюге ұшырады. Ал осы жұмыста зерттеліп отырған қорытпа аргонның статикалық атмосферасында 1273

к дейін температурада бірінші қыздыру аралығында күйдірілді (1 сурет). Графикта көрсетілгендей (2 сурет) авторлардың алған нәтижелері барлық өлшеу интервалында және өлшеу қателік шегінде [7] жұмыс деректерімен келісілген. Алайда, [5] жұмыстың деректерімен салыстыратын болса 900 К температура интервалында ғана жақсы сәйкестік бақылай аламыз. Бұл температура мәнінен жоғары мән [5] зерттеуінен берілген және осы қазіргі зерттеліп отырған жұмыс нүктесінен айтарлықтай төмен жатыр. Ал [5] – дегі $\alpha(T)$ қисығы неғұрлым күрделі мінезге ие екенін байқай аламыз. Авторлардың алған тәуелділігінде және [7] деректеріненде 1015–1076 К интервалында тек бір елеулі үзіліс (сынық) байқалады. Ал [5] жұмыста $\alpha(T)$ қисығында 1073 және 1223 К кезінде екі кіші үзіліске (сынық) ие, олар [5] сәйкес реттелген фазалардың $M23C6$ және $Ni_3(Al, Ti)$ ерігіштігіне байланысты. Бұл фазалардың ерігіштігі [5] авторларының ойы бойынша матрицалық фазада тәртіпсіздік туғызатынын алға тартады. Ал бұл температура жоғарылауымен атомдарының қозғалысын төмендетеді. Сәйкесінше, температуралық тәуелділіктерден $\alpha(T)$ үзіліс (сынық) түрінде байқалады.



3-сурет – Inconel 617 қорғасының температураөткізгіштігі. [8] (1), [7] (2), [5] (3) жұмыстарының және осы зерттеудің мәндері (4), 5 – 5 және 6 теңдеулер бойынша аппроксимация.

Үшінші суретте (1) формула және [5; 6; 7; 8] әдебиеттік шолу бойынша Inconel 617 жылуөткізгіштік есебінің нәтижесі берілген. Осы жұмыста (λ) жылуөткізгіштік есебі үшін қолданылатын (12) жұмыстан алынған жылу сыйымдылығының температуралық тәуелділігінде, 790 – 900 К температуралық интервал аралығында жоғары қарай кенет өзгеруі байқалатынын атап айтқан жөн. Ол фазалық өзгеріске байланысты болды.

Қорытпаның жылу сыйымдылық шамасы [9] жұмыста бұл тақырып бойынша анықталмаған, өйткені өлшеніп отырған ср, өзін фазалардың өзіндік жылу сыйымдылығы және фазалық өзгеріс жылуы ретінде шағылыстырды. Сондықтан берілген жұмыста жылуөткізгіштік шамасы тек 790 К дейін және 1076 К кейінгі температуралық интервалында ғана анықталды. Онда температуралық тәуелділіктер $\alpha(T)$ және $\text{sr}(T)$ тұрақты, монотонды өзгерді.

Үшінші суреттегі графиктен 800 К температура аумағында берілген жұмыстың нәтижесі жылуөткізгіштікті анықтаудың жиынтық қателіктері шегінде барлық әдебиеттік мәліметтерге [7; 8] сәйкес келеді. Ал жылуөткізгіштіктің (λ) аномальді өзгеру аймағынан жоғары болғанда [7] мәліметтерімен толық сәйкес келеді. Жоғары температура кезінде [5]-ден $\lambda(T)$ тәуелділігі нағыз зерттеудегі нүктеден айтарлықтай төмен жатыр. Максимальды айырмашылық шамамен 17 % пайызды құрайды. Ал 1475 К температурасына жақындағанда авторлардың алған қисығын кесіп өтеді.

Авторлар мақаласында [8] қорытпа, алдын ала 1450 К ауада күйдірілген және термиялық шаршауға сыналған. Оған циклдық қыздыру және салқындату, сонымен қатар болаттың таксоформалау имитациялық процессі кірді. Дегенмен, графиктен көріп отырғандарыңыздай жылуөткізгіштік бойынша [8; 9; 10] алынған деректер барлық басқа деректермен жақсы сәйкеседі. Зерттеліп отырған осы жұмыс нәтижелерімен де сәйкестігі жоғары.

Ең кіші квадраттар әдісімен қорытпаның жылуөткізгіштігі бойынша есептелінген деректер ұқсастығы бізге келесі өрнектерді ұсынды:

$$\lambda(T) = 6,922 + 7,623 \cdot 10^{-3} T + 9,0 \cdot 10^{-6} T^2, \quad 300 \leq T \leq 790 \text{ K}, \quad (5)$$

$$\lambda(T) = 5,098 + 1,965 \cdot 10^{-2} T - 2,0 \cdot 10^{-6} T^2, \quad 1076 \leq T \leq 1475 \text{ K}, \quad (6)$$

мұндағы – λ жылу өткізгіштік Вт/(м·К) өлшенеді. 5 және 6 өрнектермен есептелінген нүктелердің орташа квадраттық ауытқулары 1,1 аспайды және тиісінше 0,4 % тең.

Кестеде Inconel 617 қорғасының ұсынылған α және λ мәндері келтірілген, бұл мәндер (3) – (6) өрнегіне негізделіп алынды. Олардың болжамды анықтау қателіктері — $\delta\alpha$ и $\delta\lambda$, [11; 12; 13].

Өлшеу жұмыстары LFA-427 қондырғысында лазерлік жарқыл әдісімен 300 ден 1475 К дейінгі температура диапазонында зертханалық қондырғылар көмегімен жүргізілді. Алынған мәліметтер температура өткізгіштігі үшін температураның 2–4 % пен 3–5 % қателіктері бойынша бағаланды.

Сонымен, Inconel 617 суперқортпасының 300 ден 1475 К температура интервалында температураөткізгіштік және жылуөткізгіштік бойынша 2–4 % пен 3–5 % болжамды қателіктерін ескере отырып жаңа эксперименталды мәндер алынды.

Температураның үлкен аумағында $\alpha(T)$ және $\lambda(T)$ зерттелетін қасиеттердің қисық сызықтары әлсіз сызықты емес тәуелділіктерге ие. Ал $\alpha(T)$ қисығында 1015-1076 К аймағында айқын үзіліс байқалады, бұл фазалық түрлендіруге шартталған. Қазіргі кезде бар әдебиеттік мәліметтермен α және λ мәндері бойынша өлшенген шамаларды салыстыратын болсақ шынайылығын растайды.

Inconel 617 қортпасының температураөткізгіштік және жылуөткізгіштік бойынша ұсынылған мәндер және олардың болжамды қателіктері бойынша алынған мәліметтер негізінде кесте құрылды. Бұл кесте болашақта әр түрлі инженерлік зерттеулер мен ғылыми талдауларда қолдануға қажет болатын анықтамалық мәндер болып табылады. Сонымен қатар инженерлік мәселелерді шешуде эксплуатациялық параметрлерлерге жуық есептеу жұмыстарын жүргізуде, яғни энергетика, машина жасау, металлургия және басқада өндірістік салаларда қондырғылар мен тетіктерді жасауда қолдануға болады.

1-кесте – Inconel 617 қортпасының температураөткізгіштік және жылуөткізгіштік бойынша ұсынылған мәндер және олардың болжамды қателіктері.

T, K	α , мм ² /с	λ , Вт/(м ² К)	$\delta\alpha$, %	$\delta\lambda$, %
300	2,87	10,02	2,0	3,0
400	3,11	11,41	2,1	3,1
500	3,38	12,98	2,2	3,2
600	3,66	14,73	2,3	3,3
T, K	α , мм ² /с	λ , Вт/(м·К)	$\delta\alpha$, %	$\delta\lambda$, %
700	3,97	16,67	2,4	3,4
790	4,30	18,56	2,5	3,5
900	4,65	–	2,6	–
1000	5,02	–	2,7	–
1015	5,08	–	2,7	–
1076	4,72	23,92	2,8	3,8
1100	4,78	24,29	2,8	3,8

1200	5,04	25,79	2,9	3,9
1300	5,29	27,25	3,0	4,0
1400	5,53	28,68	3,5	4,5
1475	5,70	29,72	4,0	5,0

Қорытынды

Нәтижелерді талқылау бөлімінде алынған нәтижелер зерттеудің маңыздылығын дәлелде болып табылады, өйткені никель қорытпаларының біршамасы құйманың микроқұрылымына және құрылымына байланысты болады. Ал ол жоғары критикалық қысым мен температуралы агрессивті ортада қолданған кезде жылуөткізгіштікке және жылу диффузиясына әсер етеді. Сонымен қатар келесі жайтты ескеру қажет, басқа ғалымдардың зерттеу жұмыстарында жоғары температурада қорытпа қорының ескіруі кезінде жылуфизикалық қасиеттері өзгеріссіз қалған. Сондықтан, зерттеудің мақсаты 1475 К дейінгі жоғары температурада қорытпаның жылуфизикалық қасиетін зерттеу болып табылады. Яғни, өндірістік жылуалмастырғыш қондырғылар жоғары критикалық параметірлерде және агрессивті ортада жұмыс істегендіктен қондырғыға тұтастай әсер етеді.

REFERENCES

- 1 **Agazhanov A. Sh., Abdullaev R. N., Samoshkin D. A., Stankus S. V.** Thermal conductivity and thermal diffusivity of Li-Pb eutectic in the temperature range of 293–1273 K // Fusion Engng. Design, – 2020. – Vol. 152. – No. 111–456. – P. 1–5.
- 2 **Cape J. A., Lehman G. W.** Temperature and finite pulse-time effects in the flash method for measuring thermal diffusivity // J. Appl. Phys. – 1963. – Vol. 34. – No. 7. – P. 1909–1913.
- 3 **Blumm J., Opfermann J.** Improvement of the mathematical modeling of flash measurement // High Temp. – High Press, – 2002. – Vol. 34, – No. 5. – P. 515–521.
- 4 **Kozlovskii Yu. M., Stankus S. V.** The linear thermal expansion coefficient of Inconel 617 alloy // J. Phys. Conf. Ser. – 2021. – Vol. – 2119. – P. 012136-1–012136-4.
- 5 **Rai A.K., Trpathy H., Hajra R.N., Raju S., Saroja S.** Thermophysical properties of Ni based super alloy 617 // J. Alloys Compounds, – 2017. – Vol. 698. P. 442–450.

6 **Agazhanov A. Sh., Samoshkin D. A., Klovsii Yu. M.** Thermophysical properties of Inconel 718 alloy // J. Phys. Conf. Ser. – 2019. – Vol. 1382. – P. 012175-1–012175-5.

7 **Rabin B. H., Swank W. D., Wright R. N.** Thermophysical Properties of Alloy 617 from 25 °C to 1000 °C // Nuclear Engng Design. – 2013. – Vol. 262. – P. 72–80.

8 **Birol Y.** Thermal fatigue testing of Inconel 617 and Stellite 6 alloys as potential tooling materials for thixoforming of steels // J. Materials Sci. Eng. A. 2010. – Vol. 527, – No. 7–8. – P. 1938–1945.

9 **Samoshkin D. A., Agazhanov A. Sh., Stankus S. V.** Heat capacity of Inconel 617 alloy // J. Phys. Conf. Ser. – 2021. – Vol. 2119. – P. 012138-1–012138-5.

10 **Guo Y., Wang B., Hou S.** Aging precipitation behavior and mechanical properties of Inconel 617 superalloy // Acta Metall. Sinica. Engl. Letters. – 2013. – Vol. 26. – No. 3. – P. 307–312.

11 **El-Awadi G.A., Abdel-Samad S., Elshazly E.S.** Hot corrosion behavior of Ni based Inconel 617 and Inconel 738 superalloys // Appl. Surf. Sci. – 2016. – Vol. 378. – P. 224–230.

12 **Jo T.S., Kim S.H., Kim D.G., Park J.Y., Kim Y.D.** Thermal degradation behavior of Inconel 617 alloy // Metals and Materials. Inttrn. 2008. – Vol. 14, – No. 6. – P. 739–743.

13 **Birol Y.** High temperature sliding wear behaviour of Inconel 617 and Stellite 6 alloys // Wear. 2010. Vol. 269. – No. 9–10. P. 664–671.

Received 12.06.25.

Received in revised form 01.08.25.

Accepted for publication 05.12.25.

*М. С. Канатинов¹, *А. Т. Байдилдина², Е. С. Дүйсембаева³,
А. Ш. Агажанов⁴, Д. А. Самошкин⁵*

^{1,2,3}Восточно-Казахстанский технический университет имени

Д. Серикбаева, Республика Казахстан, г. Усть-Каменогорск;

⁴Новосибирский государственный университет,

Российская Федерация г. Новосибирск;

⁵Институт теплофизики имени С. С. Кутателадзе,

Российская Федерация, г. Новосибирск.

Поступило в редакцию 12.06.25.

Поступило с исправлениями 01.08.25.

Принято в печать 05.12.25.

ИССЛЕДОВАНИЕ ТЕПЛОПРОВОДНОСТИ И ТЕМПЕРАТУРОПРОВОДНОСТИ СПЛАВА INCONEL 617

Данное исследование показало, что одним из наиболее перспективных сплавов является сплав Inconel 617, так как структурно-химическом составе имеется хром, никель, кобальт, молибден способный придать материалу жаропрочные свойства в агрессивных средах. Несмотря на то, что многие физико-механические свойства сплава были исследованы, температуропроводность и теплопроводность, которые играют важную роль в процессе эксплуатации и воздействуют на расширение металла, до сих пор не изучены, поэтому данная исследовательская работа является актуальной. Измерение проводилось в лабораторных установках в диапазоне температур от 300 до 1475 К методом лазерной вспышки на установке LFA-427. Полученные данные оценивались в погрешности от температуры 2–4 % и 3–5 % для температуропроводности. На основе проведенных исследований были получены аппроксимирующие уравнения температурой зависимости свойств материала, а также составлена таблица справочных значений, которые могут быть использованы в различных инженерных исследованиях при решении различных задач. В статье доказано, что промышленные теплообменные установки влияют на установку в целом, так как работают в условиях высоких критических параметров и агрессивных сред.

Ключевые слова: сплав Inconel 617, температуропроводность, теплопроводность, метод лазерной вспышки, теплоэнергетика.

*М. Kanapinov¹, *А. Baidildina², G. Duysymbaeva³,*

А. Agazhanov⁴, D. Samoshkin⁵

^{1,2,3}D. Serikbayev East Kazakhstan Technical University,

Republic of Kazakhstan, Ust-Kamenogorsk;

⁴Kutateladze Institute of Thermophysics,

Russian Federation, Novosibirsk;

⁵Novosibirsk State University, Russian Federation, Novosibirsk.

Received 12.06.25.

Received in revised form 01.08.25.

Accepted for publication 05.12.25.

RESEARCH OF THERMAL CONDUCTIVITY AND THERMAL DIFFUSIVITY OF INCONEL 617 ALLOY

This study has shown that one of the most promising alloys is Inconel 617, due to the presence of chromium, nickel, cobalt, and molybdenum in its chemical composition, which impart heat-resistant properties to the material in aggressive environments. Although many physical and mechanical properties of the alloy have been studied, thermal diffusivity and thermal conductivity – which play a crucial role during operation and influence the thermal expansion of the metal – have not yet been thoroughly investigated. Therefore, this research is of current relevance. Measurements were carried out using laboratory equipment over a temperature range of 300 to 1475 K by the laser flash method on an LFA-427 setup. The obtained data were evaluated with an uncertainty of 2–4 % for temperature and 3–5 % for thermal diffusivity. Based on the research, approximating equations for the temperature dependence of the material properties were derived, and a reference table of values was compiled. These results can be used in various engineering studies to solve a wide range of problems. The article demonstrates that industrial heat exchanger units affect the overall system, as they operate under conditions of high critical parameters and aggressive environments.

Keywords: Inconel 617 alloy, thermal diffusivity, thermal conductivity, laser flash method, heat power engineering.

МРНТИ 44.31.35

<https://doi.org/10.48081/WQZN6734>

**А. Е. Карманов¹, А. С. Никифоров², Ж. А. Тулебаева³,
А. У. Габдулов⁴, *Н. М. Арипова⁵**

^{1,2,3,4,5}Торайғыров университет, Республика Казахстан, г. Павлодар.

¹ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-7512-0275>

²ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-6977-0957>

³ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-4289-9777>

⁴ORCID: <https://orcid.org/0009-0001-3266-8270>

⁵ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-2760-8617>

*e-mail: nazgul_2010@mail.ru

АНАЛИЗ СЖИГАНИЯ УГОЛЬНЫХ ОТХОДОВ С МИНИМИЗАЦИЕЙ ВЫБРОСОВ ВРЕДНЫХ ВЕЩЕСТВ

В данной статье приведены исследования сжигания угольных отходов с минимизацией выбросов. В настоящее время одной из актуальных проблем в Республике Казахстан является необходимость утилизации отходов углеобогащения. Многочисленные исследования показывают, что отходы углеобогащения можно эффективно использовать в различных отраслях: в энергетической, в черной и цветной металлургии, в строительной промышленности и др.

Сжигание угольных отходов является одним из наиболее перспективных способов утилизации продуктов углеобогащения и шахтных остатков. Однако традиционные методы сопровождаются значительными выбросами загрязняющих веществ.

Авторы различных исследований предлагают использование технологий и методов, направленных на снижение вредных выбросов в атмосферу при сжигании угольных отходов, таких как зола, шлак и другие продукты переработки угля. Основные подходы включают в себя: использование более эффективных технологий сжигания, применение систем очистки дымовых газов, а также внедрение более чистых видов топлива.

Сжигание угольных отходов при использовании современных технологий может стать экологически безопасным источником энергии. Наиболее перспективными направлениями являются FBC,

IGCC и oxy-combustion, а также комплексные системы очистки дымовых газов.

Ключевые слова: угольные отходы, выбросы, технологий сжигания, пустая порода, теплота сгорания, шламы, кипящий слой.

Введение

Согласно исследованиям, каждый год около 46 % добытого угля превращается в отходы (очистки, шламы, пустая порода и т.п.). С учётом добычи 8,993 млрд тонн, это означает образование приблизительно 4,1 млрд тонн угольных отходов ежегодно.

Только в Китае ежегодно образуется до 7 млрд тонн пустой угольной породы, организованной в отвал поблизости от действующих шахт рисунок 1.



Рисунок 1 – Отвал угольной породы

Материал отвалов – это верхние (вскрышные породы) слои грунта, горных пород и породы, находящиеся с боков и снизу месторождения (вмещающие породы), которые покрывают полезное ископаемое и должны быть удалены для обеспечения доступа к нему.

В США сама добыча угля образует примерно 0,4 т отходов на 1 т добытого угля, включая отвалы, хвосты обогащения, шламы и т.п. → при добыче 438 млн тонн, это означает около 175 млн тонн отходов в год только в США [1]. Ежегодно в мире образуется порядка 4 млрд тонн угольных отходов, включая пустую породу, шламы, угольную крошку, золошлак и др.

Эффективная утилизация и переработка этих отходов (например, сжигание с минимизацией выбросов) – приоритетная задача с точки зрения экологии и лечения окружающей среды.

Материалы и методы

Казахстан по запасам угля в размере 29,4 млрд тонн (или 2,4 % мировых запасов), где 2/3 приходится на бурый уголь, 1/3 – на каменный уголь.

Крупнейшие угольные бассейны расположены в центральной и северной частях страны: Экибастузский (10 млрд тонн), Карагандинский (6,9 млрд тонн) и Тургайский (5,9 млрд тонн) (77,5 % разведанных запасов угля).

Уголь содержит в себе «чистое» топливо – это 75–95 % углерода и негорючие элементы [1].

В настоящее время одной из актуальных проблем в РК является необходимость утилизации отходов углеобогащения. Многочисленные исследования показывают, что отходы углеобогащения можно эффективно использовать в различных отраслях: в энергетической, в черной и цветной металлургии, в строительной промышленности и др.

Повышение роли угля в топливноэнергетическом балансе страны является одной из приоритетных задач Энергетической стратегии страны [2].

Сжигание угольных отходов является одним из наиболее перспективных способов утилизации продуктов углеобогащения и шахтных остатков. Однако традиционные методы сопровождаются значительными выбросами загрязняющих веществ. Цель статьи – рассмотреть современные технологии, позволяющие минимизировать воздействие на окружающую среду.

Угольные отходы при неконтролируемом хранении и сжигании становятся источником значительного загрязнения воздуха и почвы. Основные загрязнители включают диоксид серы (SO₂), оксиды азота (NO_x), твёрдые частицы, ртуть и другие тяжёлые металлы. Для их снижения разрабатываются новые методы сжигания и очистки дымовых газов.

Согласно классификации по минеральному и химическому составу отвальные породы, по типу Подмосквовного и Челябинского угольных бассейнов, образуют песчано-глинистыми, глинистыми и известково-песчано-глинистыми типами. Диапазон усредненного содержания основных компонентов отходов каждого южного бассейна России приведен в таблице 1 [3; 4; 5].

Таблица 1 – Содержание основных компонентов отходов южного бассейна России

Бассейн	SiO ₂ %	Al ₂ O ₃ %	Fe ₂ O ₃ %	CaO%	MgO%	C%
Кузнецкий	32-78	15-22	2-7	1-4	0.5-3	8-22
Печорский	61-65	20-24	6-8	1-2	2-4	10-18
Иркутский	56-58	18-21	2-4	3-5	2-3	13-16
Донецкий	43-48	18-20	2-8	2-3	2-3	2-10

Теплота сгорания углеродсодержащих отходов составляет от 5 до 12 МДж/кг. Это значение относительно низкое, что говорит о том, что,

материал непригоден для энергетики без обогащения или использования современных технологий сжигания.

Результаты и обсуждение

Рассмотрим возможные схемы утилизации углесодержащих отходов с генерацией теплоты.

1 Прямое сжигание в котлах

Отходы углеобогащения используют как энергетическое сырье путем сжигания в качестве низкосортного топлива (при определенном содержании горючих составляющих) [4];[5]. При малом содержании горючей части возможно сжигание смеси отвальных пород (до 20 %) с углём[6];[7].

Недостатками данного способа являются:

- сложность, а чаще всего невозможность, сжигания отвальных пород без добавок;
- высокое содержание негорючей части в топливе;
- необходимость специальных теплогенерирующих устройств для сжигания [8].

2 Сжигание в циркулирующем кипящем слое (ЦКС)

Циркулирующий кипящий слой (ЦКС), позволяющий сжигать топливо при низких температурах, снижая выбросы SO_2 и NO_x .

Исследования показывают, что внедрение технологий ЦКС и IGCC позволяет повысить КПД на 10 % и сократить выбросы NO_x и SO_2 более чем на 90 %. Совместное сжигание угля и угольных шламов также снижает антропогенные выбросы без ухудшения энергетической эффективности [9; 10].

FBC (ЦКС) снижает выбросы SO_2 на 90 %, NO_x – до 50 %, но требует сложного оборудования. IGCC обеспечивает высокую степень очистки, но имеет высокие капитальные затраты. Оху-combustion и CLC дают концентрированный CO_2 , упрощая его улавливание. Технология FLOX уменьшает NO_x за счёт равномерного температурного поля.

Основным недостатком данного способа является сложность конструкции и эксплуатации установки.

3 Интегрированная газификация с комбинированным циклом (IGCC), где угольные отходы превращаются в синтез-газ с очисткой от примесей.

4 Сжигание отходов углеобогащения в ретортных горелках

Ретортные горелки применяются для сжигания угольных отходов, особенно мелкодисперсных фракций. Они обеспечивают стабильное горение за счёт равномерной подачи топлива и воздуха в зону горения. В сочетании с рециркуляцией уходящих газов (REUNKOM) достигается снижение температуры пламени и сокращение образования оксидов азота. Такая технология также повышает полноту сгорания топлива и уменьшает

количество механического недожога. Технологий сжигания угольных отходов приведена в таблице 2.

Таблица 2 – Сравнительная таблица технологий сжигания угольных отходов

Технология	КПД	Снижение SO_2	Снижение NO_2	Особенности
FBC (ЦКС)	До +10 %	До 90 %	До 50 %	Гибкость по топливу
IGCC	Высокий	>90 %	>80 %	Газификация, высокий CAPEX
Оху-combustion	Высокий	>95%	>70%	Концентрированный CO_2
FLOX	Средний	-	До 60 %	Безпламенное горение
Ретортные горелки с REUNKOM	До +8 %	До 85 %	До 70 %	Снижение NO_2 за счёт рециркуляции

Информация о финансировании

Исследование финансируется Комитетом науки Министерства науки и высшего образования Республики Казахстан (грант №AP26196911).

Выводы

Результаты исследования имеют важное прикладное значение для энергетической отрасли Казахстана и стран СНГ. Использование современных технологий сжигания угольных отходов (ЦКС, IGCC, оху-combustion, FLOX, ретортные горелки) позволяет:

- сократить выбросы SO_2 , NO_x и твёрдых частиц до 90 %, что значительно улучшает экологическую ситуацию;
- модернизировать существующие котельные установки, в том числе паровые котлы типа ДКВР, оснащая их ретортными горелками;
- использовать угольные отвалы и шламы как дополнительное топливо без снижения КПД;
- повысить КПД на 8–12 % за счёт IGCC, ЦКС и применения ретортных горелок;
- обеспечить выполнение международных экологических стандартов.

Сжигание угольных отходов при использовании современных технологий может стать экологически безопасным источником энергии. Наиболее перспективными направлениями являются FBC, IGCC и оху-combustion, а также комплексные системы очистки дымовых газов.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

- 1 **Дмитриева, В. А.** К вопросу об образовании отходов угольной промышленности [Текст] // Символ науки. – 2017. – №1. – С. 56–58.
- 2 Концепция развития электроэнергетической отрасли Республики Казахстан до 2035 года. [Электронный ресурс]. – Режим доступа: – <https://www.kazenergy.com/upload/document/electric/project2035>
- 3 Патент №RU2607836C1 Российская Федерация. Установка по обогащению углесодержащих отходов шахтных и обогатительных фабрик.
- 4 Утилизация отходов топливно-энергетического комплекса. [Электронный ресурс]. – Режим доступа: – <https://ecoportal.su/public/waste/view/422.html>
- 5 **Балакирев, В. А.** Технологии сжигания твёрдого топлива в энергетике. – М.: Энергоатомиздат. – 2020. – 320 с.
- 6 **Кондратьев, А. И.** Очистка дымовых газов от вредных выбросов. – СПб. : Наука.–2019. – 280 с.
- 7 **Минаев, С. С., Головин, Д. Ю.** Перспективы использования угольных отходов в энергетике [Текст] // Вестник энергетике. – 2021. – № 4. – С. 15–23.
- 8 **Smith, J., & Brown, L.** Advances in Fluidized Bed Combustion for Waste Coal Utilization. // Energy Reports. – 2022. – № 8. – P. 145–159.
- 9 **Zhao, H. Wang, Y.** Oxy-Combustion and Chemical Looping for Low-Emission Power Plants. // Applied Energy. – 2021. – № 295. – 117023.
- 10 **Иванов, Н. В.** Методы снижения выбросов при сжигании угля и его отходов [Текст] // Экология и промышленность. – 2020. – № 6. – С. 42–51.

REFERENCES

- 1 **Dmitrieva, V. A.** K voprosu ob obrazovanii othodov ugolnoj promyshlennosti [On the issue of waste generation in the coal industry] [Text] // Simvol nauki. – 2017. – № 1. – P. 56–58.
- 2 Konceptsiya razvitiya elektroenergeticheskoy otrasli Respubliki Kazahstan do 2035 goda. Rezhim dostupa [The concept of development of the electric power industry of the Republic of Kazakhstan until 2035]. [Electronic resource]. – Access mode:] – <https://www.kazenergy.com/upload/document/electric/project2035>
- 3 Patent №RU2607836C1 Rossijskaya Federaciya. Ustanovka po obogashcheniyu uglesoderzhashchih othodov shahtnyh i obogatitel'nyh fabrik [Patent № RU2607836C1 Russian Federation. The plant for the enrichment of carbon-containing waste from mines and processing plants].

- 4 Utilizaciya othodov toplivno-energeticheskogo kompleksa. Rezhim dostupa [Waste disposal of the fuel and energy complex]. [Electronic resource]. – Access mode:] – <https://ecoportal.su/public/waste/view/422.html>
- 5 **Balakirev, V. A.** Tekhnologii szhiganiya tvyordogo topliva v energetike [Technologies of solid fuel combustion in the energy sector]. – М. : Energoatomizdat. – 2020. – 320 p.
- 6 **Kondrat'ev, A. I.** Ochistka dymovyh gazov ot vrednyh vybrosov [Purification of flue gases from harmful emissions]. – Spb.: Nauka. – 2019. – 280 p.
- 7 **Minaev, S. S., Golovin, D. YU.** Perspektivy ispol'zovaniya ugol'nyh othodov v energetike [Prospects for the use of coal waste in the energy sector] [Text] // Vestnik energetiki. – 2021. – №4. – P. 15–23.
- 8 **Smith, J., & Brown, L.** Advances in Fluidized Bed Combustion for Waste Coal Utilization. Energy Reports. – 2022. – №8. – P. 145–159.
- 9 **Zhao, H. Wang, Y.** Oxy-Combustion and Chemical Looping for Low-Emission Power Plants. Applied Energy. – 2021. – №2957. – P. 117–023.
- 10 **Ivanov, N. V.** Metody snizheniya vybrosov pri szhiganiy uгля i ego othodov [Methods of reducing emissions from burning coal and its waste] [Text] // Ekologiya i promyshlennost'. – 2020. – №6. – P. 42–51.

Поступило в редакцию 01.10.25.

Поступило с исправлениями 23.10.25.

Принято в печать 05.12.25.

А. Е. Карманов¹, А. С. Никифоров², Ж. А. Тулебаева³,

*А. У. Габдулов⁴, *Н. М. Арипова⁵*

^{1,2,3,4,5}Торайғыров университеті,

Қазақстан Республикасы, Павлодар қ.

01.10.25 ж. баспаға түсті.

23.10.25 ж. түзетулерімен түсті.

05.12.25 ж. басып шығаруға қабылданды.

ЗИЯНДЫ ЗАТТАР ШЫҒАРЫНДЫЛАРЫН АЗАЙТА ОТЫРЫП, КӨМІР ҚАЛДЫҚТАРЫН ЖАҒУДЫ ТАЛДАУ

Бұл мақалада шығарындыларды азайта отырып, көмір қалдықтарын жағу бойынша зерттеулер келтірілген. Қазіргі уақытта ҚР-дағы өзекті мәселелердің бірі көмірді байыту қалдықтарын кәдеге жарату қажеттілігі болып табылады. Көптеген зерттеулер Көмірді байыту қалдықтарын әртүрлі салаларда тиімді пайдалануға

болатындығын көрсетеді: энергетика, қара және түсті металлургия, құрылыс өнеркәсібі және т. б.

Көмір қалдықтарын жағу-көмір байыту өнімдері мен шахта қалдықтарын жоюдың ең перспективалы әдістерінің бірі. Дегенмен, дәстүрлі әдістер ластаушы заттардың айтарлықтай шығарындыларымен бірге жүреді.

Мақаланың мақсаты-қоршаған ортаға әсерді азайтуға мүмкіндік беретін заманауи технологияларды қарастыру

Әртүрлі зерттеулердің авторлары күл, қож және басқа да көмір өңдеу өнімдері сияқты көмір қалдықтарын жағу кезінде атмосфераға зиянды шығарындыларды азайтуға бағытталған технологиялар мен әдістерді пайдалануды ұсынады. Негізгі тәсілдерге мыналар жатады: жанудың тиімді технологияларын қолдану, түтін газын тазарту жүйелерін қолдану және отынның таза түрлерін енгізу.

Көмір қалдықтарын заманауи технологиялармен жағу экологиялық таза энергия көзі бола алады. Ең перспективалы бағыттар-FBC, IGCC және oxy-combustion, сондай-ақ түтін газын тазартудың кеішенді жүйелері.

Кілтті сөздер: көмір қалдықтары, шығарындылар, жану технологиялары, бос жыныстар, жану жылуы, шламдар, қайнаған қабат.

A. E. Karmanov¹, A. S. Nikiforov², Zh. A. Tulebaeva³,

A. U. Gabdulov⁴, *N. M. Aripova⁵

^{1,2,3,4,5}Toraighyrov University, Republic of Kazakhstan, Pavlodar.

Received 01.10.25.

Received in revised form 23.10.25.

Accepted for publication 05.12.25.

ANALYSIS OF COAL WASTE INCINERATION WITH MINIMIZING EMISSIONS OF HARMFUL SUBSTANCES

This article presents research on the incineration of coal waste with minimal emissions. Currently, one of the pressing issues in the Republic of Kazakhstan is the need to dispose of coal enrichment waste. Numerous studies show that coal enrichment waste can be effectively used in various industries: energy, ferrous and non-ferrous metallurgy, construction, etc.

The incineration of coal waste is one of the most promising methods of disposing of coal enrichment products and mine residues. However, traditional methods are accompanied by significant emissions of pollutants.

The authors of various studies propose the use of technologies and methods aimed at reducing harmful emissions into the atmosphere during the incineration of coal waste, such as ash, slag, and other coal processing products. The main approaches include: the use of more efficient combustion technologies, the application of flue gas cleaning systems, and the introduction of cleaner fuels.

The incineration of coal waste using modern technologies can become an environmentally safe source of energy. The most promising areas are FBC, IGCC, and oxy-combustion, as well as integrated flue gas cleaning systems.

Keywords: coal waste, emissions, combustion technologies, waste rock, calorific value, sludge, fluidized layer.

<https://doi.org/10.48081/ORTS5256>

**А. Е. Кулакаева¹, Б. Ж. Медетов², Е. А. Дайнеко³,
А. З. Айтмагамбетов⁴, *Б. А. Кожаметова⁵**

^{1,3,4,5}Международный университет информационных технологий,
Республика Казахстан, г. Алматы;

²Евразийский национальный университет имени Л. Н. Гумилева,
Республика Казахстан, г. Астана;

³Satbayev University, Республика Казахстан, г. Алматы.

¹ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-0143-085X>

²ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-5594-8435>

³ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-6581-2622>

⁴ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-7808-5273>

⁵ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-9566-3629>

*e-mail: kozahmetova.ba@gmail.com

ПОВЫШЕНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ ПРИЕМА РАДИОСИГНАЛОВ В СПУТНИКОВЫХ СИСТЕМАХ РАДИОМОНИТОРИНГА

В данной статье представлен подход к повышению эффективности приема и восстановления радиосигнала в спутниковых системах радиомониторинга на базе низкоорбитальных малых космических аппаратов с использованием фильтра Калмана. Актуальность исследования обусловлена необходимостью эффективного контроля использования радиочастотного спектра на обширных и труднодоступных территориях, где традиционные наземные системы радиоконтроля оказываются ограниченными по зоне покрытия и чувствительности. Предложена математическая модель, описывающая процесс формирования и приема гармонического радиосигнала в условиях наличия шумов и помех, а также особенности цифровой обработки измерений на борту малого космического аппарата. Реализован численный эксперимент, в ходе которого проведен анализ эффективности фильтра Калмана при различных уровнях отношения сигнал/шум (от 3 до -5 дБ) и разной длительности наблюдения.

Показано, что уже при умеренном уровне шума фильтр Калмана позволяет достигать коэффициента сходства между истинным

и восстановленным сигналом выше 0,94 (94 %) при относительно короткой длительности приема. При ухудшении условий отношения сигнал/шум до -5 дБ фильтр сохраняет работоспособность, хотя для достижения приемлемого качества требуется больший объем данных. Полученные результаты подтверждают высокую устойчивость предложенного метода к шумовым воздействиям и возможность его использования для обнаружения и идентификации источников радиоизлучения.

Ключевые слова: радиомониторинг, источник излучения, фильтр Калмана, радиосигнал, спектр, малый космический аппарат.

Введение

Эффективное управление радиочастотным спектром (РЧС) невозможно без постоянного радиомониторинга, который обеспечивает контроль использования радиочастотного спектра как на национальном, так и на международном уровнях. В Республике Казахстан такие задачи решаются Службой эксплуатации систем радиомониторинга при РГП «Государственная радиочастотная служба» Министерства цифрового развития, инноваций и аэрокосмической промышленности. Существующая система радиомониторинга включает наземные стационарные, передвижные и мобильные комплексы, однако ограничена по зоне покрытия и плотности контрольных пунктов, что снижает ее эффективность в условиях обширной территории страны.

В международной практике все большую актуальность приобретают спутниковые системы радиомониторинга на базе малых космических аппаратов (МКА), позволяющие существенно расширить охват, повысить оперативность обнаружения и идентификации источников радиоизлучения, а также интегрироваться в действующую инфраструктуру радиоконтроля [1; 2; 3; 4; 5]. Основной задачей при организации спутникового радиомониторинга становится выделение и оценка параметров полезного сигнала на фоне помех и случайных искажений, что требует применения современных адаптивных методов цифровой фильтрации [6].

Для решения задач выделения полезного сигнала и повышения точности обнаружения источников радиоизлучения в спутниковых системах радиомониторинга в ряде исследований успешно использовались фильтр Калмана и его модификации. Применение таких алгоритмов позволило повысить достоверность оценки параметров сигнала и обеспечить устойчивую работу системы в условиях значительных уровней шума [7; 8; 9; 10]. Применение фильтра Калмана обеспечивает устойчивую работу системы даже при наличии шумов, случайных возмущений и неполной

априорной информации о параметрах сигнала, что особенно важно для задач автоматического радиоконтроля с борта МКА [11; 12]. Тем не менее, в существующих работах недостаточно полно исследованы вопросы практической реализации и устойчивости фильтра Калмана на борту МКА при реальных сценариях спутникового радиомониторинга.

Материалы и методы

В данной работе для расчета энергетического бюджета радиолинии системы спутникового радиомониторинга использованы подходы, учитывающие влияние атмосферных и климатических факторов на мощность сигнала на входе бортового измерительного приемника. В качестве исходных данных были выбраны минимальные характеристики оборудования и параметры реальных действующих наземных радиоэлектронных средств, функционирующих в Республике Казахстан в диапазоне частот от 94 МГц до 14 ГГц. Проведенные расчеты охватывали различные типы источников: станции мобильной связи (GSM, UMTS, LTE), телевидение (DVB-T2), FM-радио, а также земные станции спутниковой связи в диапазонах X и Ku [13].

В качестве экспериментальной базы для анализа использованы данные о характеристиках телеметрических сигналов, полученные с борта спутника KazEOSat-2 в различные периоды наблюдений. Измерения проводились на оборудовании национальной компании «Қазақстан Ғарыш Сапары» и показали, что уровни сигналов на входе бортового приемника находились в диапазоне от -85 дБм до -120 дБм при высоте орбиты 630 км, что соответствует условиям реального спутникового радиомониторинга [14].

Для выделения полезного сигнала из шума выбран и реализован дискретный фильтр Калмана на языке Python. Алгоритм тестировался на модельных данных с параметрами, соответствующими реальным условиям приема радиосигнала.

Результаты и обсуждение

В задачах спутникового радиомониторинга для определения текущих координат источников наземного радиоизлучения (x) используется радиоприемное оборудование, установленное на борту низкоорбитального МКА. В каждый момент времени на входе бортового измерительного приемника регистрируется наблюдаемое значение (z), которое представляет собой результат искажения исходного сигнала (x) случайными шумами и помехами (n). Здесь n – случайная величина, возникающая как в процессе передачи по каналу связи, так и непосредственно при измерении. В связи с этим бортовой приемник фиксирует не истинные значения параметров сигнала, необходимых для точного определения координат источника, а искаженные значения. Задача приемного устройства на борту МКА заключается в максимально эффективном и достоверном восстановлении

полезного сигнала (x). Очевидно, что получение абсолютно точных параметров сигнала невозможно – поэтому вычисляются лишь приближенные оценки этих параметров, которые далее обозначаются как \hat{x} .

При приеме сигнала математическая модель системы может быть записана в следующем виде:

$$\dot{x} = \frac{dx}{dt} = F(x, t) \quad (1)$$

где, x – вектор состояний исследуемой системы; $F(x, t)$ – функция, определяющая эволюцию (динамику) системы во времени.

Следовательно, если наблюдаемый сигнал можно выразить через производную \dot{x} , то для эффективного выделения полезного сигнала из совокупности помех возможно применение фильтра Калмана.

При определении координат наземных источников радиоизлучения на базе одного низкоорбитального МКА, будем рассматривать задачу обнаружения гармонического сигнала, принимаемого как несущее колебание. Такой сигнал можно описать выражением:

$$x(t) = U \cos(\omega_0 t + \varphi_0) \quad (2)$$

где U – амплитуда, ω_0 – круговая частота, φ_0 – начальная фаза.

Однако такое представление сигнала не соответствует требованиям применения фильтра Калмана, поскольку данный фильтр реализуется для систем, описываемых дифференциальными уравнениями первого порядка. Поэтому перед переходом к фильтрации необходимо записать математическую модель в дифференциальной форме. Для этого требуется определить такое дифференциальное уравнение, решением которого является функция (2). Таким образом, перед использованием фильтра Калмана необходимо решить промежуточную задачу – привести исходную модель сигнала к системе дифференциальных уравнений. Если найденная система позволяет получить решение в виде функции (2), она может быть использована для дальнейшей реализации фильтра Калмана.

Далее запишем уравнение, описывающее динамику гармонического осциллятора:

$$\ddot{x} + \omega_0^2 x = 0 \quad (3)$$

Далее необходимо понизить порядок дифференциального уравнения. Для этого введем вспомогательные параметры:

$$\begin{cases} \dot{x} = v \\ \dot{v} + \omega_0^2 x = 0 \end{cases} \quad (4)$$

где v – скорость изменения сигнала.

Следовательно,

$$\frac{dx}{dt} = v(t)$$

$$\begin{cases} \frac{dx}{dt} = v(t) \\ \frac{dv}{dt} = -\omega_0^2 x(t) \end{cases} \quad (5)$$

Исходя из системы (5), можно записать соответствующее разностное уравнение:

$$\begin{cases} \frac{x_{k+1} - x_k}{dt} = v_k \\ \frac{v_{k+1} - v_k}{dt} = -\omega_0^2 x_k \end{cases} \quad (6)$$

Преобразуя уравнения (6), получаем окончательное выражение, с помощью которого можно определить каждое последующее значение сигнала. Поэтому для применения фильтра Калмана уравнения реальных значений сигналов принимают следующий вид:

$$\begin{cases} x_{k+1} = x_k + v_k dt \\ v_{k+1} = v_k - \omega_0^2 x_k dt \end{cases} \quad (7)$$

В результате, искомый сигнал представляется согласно уравнению (7)

$$\begin{cases} x_{k+1} = x_k + v_k dt + \varepsilon_k \\ z_k = x_k + \eta_k \end{cases} \quad (8)$$

где ε_k – ошибка модели, обусловленная неточностями используемой математической модели; η_k – техническая погрешность, связанная с наличием шумов и несовершенством сенсора ($\eta_k = \eta_k^{(1)} + \eta_k^{(2)}$, $\eta_k^{(1)}$ – шум $\eta_k^{(2)}$, – погрешность прибора).

Если $\eta_k^{(2)} \ll \eta_k^{(1)}$ выполняется, то η_k фактически действие шума.

Следовательно, выражение $x_{k+1} = x_k + v_k dt + \varepsilon_k$ – выступает в роли математической модели динамики сигнала, а формула $z_k = x_k + \eta_k$ отражает измеряемое значение сигнала на каждом шаге.

Здесь $v_k dt$ – слагаемое, контролирующее эволюцию системы, ε_k – ошибка модели, x_k – реальное значение сигнала, z_k – измеренное значение, получаемое на выходе бортового измерительного приемника, η_k – шум. При этом ε_k и η_k рассматриваются как случайные величины.

Математические ожидания этих случайных величин будем считать равными нулю:

$$E\varepsilon_k = E\eta_k = 0 \quad (9)$$

Таким образом, будем считать, что шум не содержит постоянной составляющей. В дальнейшем нам потребуется учитывать дисперсии случайных величин σ_{ε}^2 и σ_{η}^2 .

Переходя к алгоритму фильтра Калмана, необходимо определить оптимальное значение сигнала y_k , которое априори неизвестно. Если известны значения x_k и z_k , то y_k будет представлять собой оптимальную оценку, лежащую между (прогноз по модели) При этом $U_k = v_k dt$.

$$x_{k+1} = x_k + U_k + \varepsilon_k \quad (10)$$

Следовательно, для определения оптимального значения между прогнозом модели x_k и результатом измерения z_k , вводится весовой коэффициент k_k . Оптимальное значение сигнала будет зависеть от выбранного коэффициента: при $k_k \rightarrow 0$ оценка полностью опирается на модель, при $k_k \rightarrow 1$ – на измерение. Таким образом, оптимальная оценка сигнала записывается следующим образом:

$$y_{k+1} = k_k z_{k+1} + (1 - k_k)(y_k + U_k) \quad (11)$$

Далее необходимо минимизировать $\varepsilon_{k+1} = x_{k+1} - y_{k+1}$. Процедура минимизации выполняется следующим образом:

$$\frac{d \sum (x_{k+1} - y_{k+1})^2}{dk} = 0 \quad (12)$$

Решив данное уравнение, приходим к следующему:

$$\varepsilon_{k+1} = (1 - k) * (\varepsilon_k + \varepsilon_k) - k * \eta_{k+1} \quad (13)$$

В конечном итоге для коэффициента фильтра Калмана получаем следующее выражение:

$$k_{k+1} = \frac{E\varepsilon_k^2 + \sigma_\varepsilon^2}{E\varepsilon_k^2 + \sigma_\varepsilon^2 + \sigma_\eta^2} \quad (14)$$

где σ_ε^2 – дисперсия ошибки модели, σ_η^2 – дисперсия ошибки наблюдения.

Практическая реализация описанного алгоритма фильтра Калмана позволяет количественно оценить эффективность восстановления истинного сигнала в условиях наличия шума. Для этого был проведен численный эксперимент, в ходе которого рассчитывалось, насколько точно восстановленный сигнал совпадает с истинным, в зависимости от длительности наблюдаемого фрагмента сигнала.

На рисунке 1 показана траектория движения низкоорбитального одного МКА над территорией РК. Антенна формирует обзор, задающий на поверхности Земли зону радиоконтроля. Размер и форма данной зоны определяются высотой орбиты, углом обзора антенны и другие параметры.



Рисунок 1 – Радиомониторинг на базе одного МКА

Для комплексной оценки эффективности применения фильтра Калмана при различных уровнях отношения сигнал/шум (ОСШ) были построены и проанализированы зависимости коэффициента сходства между истинным сигналом и сигналом, восстановленным на выходе фильтра, от

продолжительности принимаемого сигнала. Результаты представлены на рисунках 2–4.

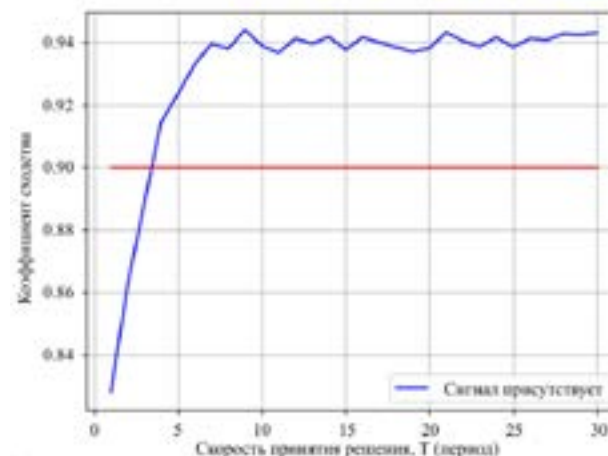


Рисунок 2 – График зависимости коэффициента сходства от продолжительности принимаемого сигнала при ОСШ 3 дБ

На рисунке 2 показан характер изменения коэффициента сходства при ОСШ 3 дБ. Уже после 6–7 периодов наблюдения коэффициент сходства превышает пороговое значение 0,9 (90 %) и далее стабилизируется на уровне около 0,94 (94 %). Это свидетельствует о высокой эффективности фильтра Калмана для обнаружения и восстановления полезного сигнала в условиях шума. Быстрое достижение высокого коэффициента сходства указывает на то, что дальнейшее увеличение длительности наблюдения не приводит к существенному улучшению качества восстановления.

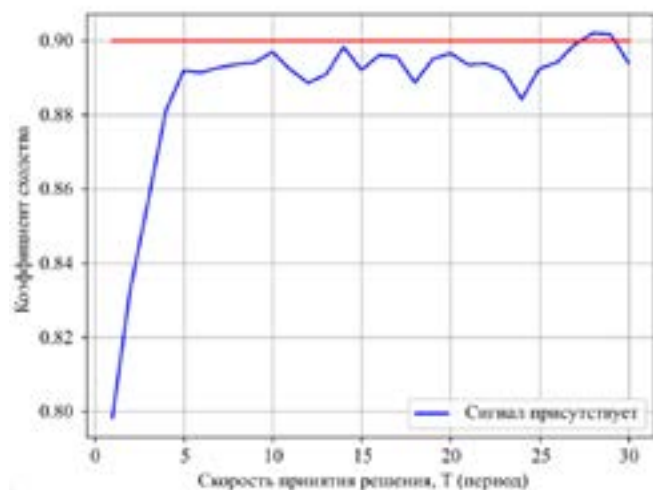


Рисунок 3 – График зависимости коэффициента сходства от продолжительности принимаемого сигнала при ОСШ -3 дБ

На рисунке 3 приведен аналогичный график для случая, когда ОСШ составляет -3 дБ. В данном случае пороговое значение коэффициента $0,9$ (90%) достигается при большем количестве периодов (около $9-10$), а дальнейшее увеличение длительности приема приводит к незначительному росту показателя, который стабилизируется на уровне около $0,9$ (90%). Это демонстрирует, что фильтр Калмана по-прежнему обеспечивает приемлемое восстановление сигнала при ухудшении условий приема, однако для достижения высокой точности требуется больший объем наблюдений.

Рисунок 4 отражает ситуацию с еще более низким отношением сигнал/шум (-5 дБ). Анализ показал, что при таких условиях коэффициент сходства лишь приближается к пороговому значению $0,9$ (90%), но фактически остается немного ниже даже при максимальной длительности наблюдения (30 периодов). На данном интервале наблюдаются колебания значения коэффициента, что связано с высокой долей шумовой составляющей в принимаемом сигнале. Тем не менее, фильтр Калмана продолжает обеспечивать относительно высокую степень совпадения восстановленного сигнала с истинным даже в условиях экстремального шума.

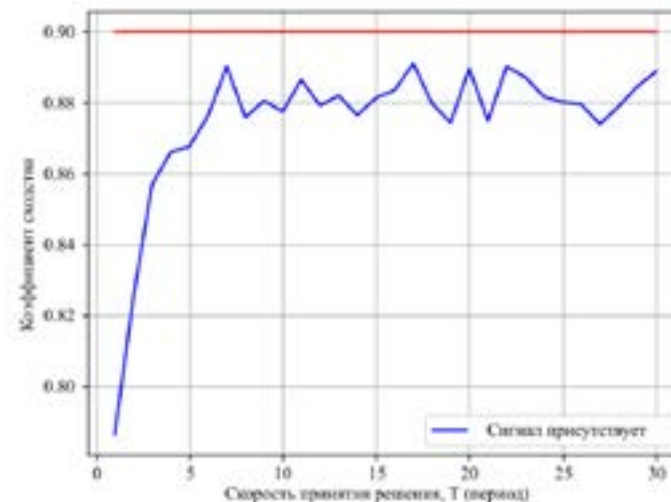


Рисунок 4 – График зависимости коэффициента сходства от продолжительности принимаемого сигнала при ОСШ -5 дБ

В совокупности, анализ рисунков 2–4 подтверждает, что предложенная реализация фильтра Калмана обладает высокой устойчивостью к шумовым воздействиям и позволяет повысить достоверность обнаружения сигнала в системе спутникового радиомониторинга, особенно при увеличении длительности принимаемого сигнала.

Обсуждение

Полученные результаты подтверждают эффективность использования фильтра Калмана для восстановления полезного сигнала в спутниковых системах радиомониторинга в условиях значительного уровня шумов. Как показал численный анализ (рисунки 1–3), уже при умеренном ОСШ 3 дБ фильтр позволяет достигать стабильно высокого коэффициента сходства между истинным и восстановленным сигналом – более $0,94$ (94%) после $6-7$ периодов наблюдения. При ухудшении условий (ОСШ -3 дБ и -5 дБ) требуется большее количество периодов для достижения порогового значения ($0,9$ или 90%), а максимальное значение коэффициента сходства снижается, однако восстановление сигнала по-прежнему остается возможным даже в экстремальных шумовых условиях.

Практическая значимость полученных результатов заключается в том, что даже при ограниченной длительности наблюдения и отсутствии полной информации о параметрах сигнала система способна обеспечивать высокую достоверность обнаружения и восстановления параметров

радиосигнала. Это открывает перспективы для интеграции спутниковых систем радиомониторинга в национальную инфраструктуру радиоконтроля, позволяя расширить зону покрытия, повысить оперативность реагирования на несанкционированные излучения и автоматизировать процессы контроля использования РЧС.

Ограничения исследования связаны с тем, что моделирование проводилось для гармонических сигналов с фиксированной частотой и без учета ряда сложных факторов реальных каналов (например, эффекта Доплера, нелинейных искажений, вариаций параметров среды).

В дальнейших работах целесообразно рассмотреть расширение математической модели на случай произвольных сигналов, а также провести эксперименты с реальными данными, включая более сложные сценарии и использование других модификаций фильтра Калмана.

Информация о финансировании.

Работа выполнена при финансовой поддержке КН МНВО РК по программе грантового финансирования научных исследований на 2025–2027 гг., грант №АР26103099.

Выводы

В данной работе была реализована и проанализирована математическая модель восстановления радиосигнала на борту низкоорбитального малого космического аппарата с применением фильтра Калмана. Проведенные численные эксперименты показали, что фильтр Калмана обеспечивает высокую эффективность обнаружения и восстановления полезного сигнала в условиях различных уровней шумов, характерных для задач спутникового радиомониторинга.

Показано, что при увеличении длительности принимаемого сигнала коэффициент сходства между истинным и восстановленным сигналом стабилизируется на высоком уровне (выше 0,9 или 90 %) даже при значительных значениях шума (ОСШ вплоть до –5 дБ). Это подтверждает практическую реализуемость и целесообразность применения данного подхода для повышения надежности и достоверности радиоконтроля в современных спутниковых системах.

Полученные результаты могут быть использованы для дальнейшего развития национальной инфраструктуры радиомониторинга и интеграции интеллектуальных алгоритмов обработки сигналов в действующие и перспективные платформы спутникового контроля. В перспективе планируется расширить математическую модель на более сложные типы сигналов, а также провести экспериментальную проверку эффективности предложенного метода на реальных данных спутниковых наблюдений.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1 **Sarda, K., Roth, N., Zee, R., CaJacob, D., Nathan, G. O.** Making the Invisible Visible: Precision RF-Emitter Geolocation from Space by the HawkEye 360 Pathfinder Mission // Proceedings of the 4S Symposium, Sorrento. – Italy. – 28 May–1 June 2018.

2 **Pelton, J. N.** Radio-Frequency Geo-location and Small Satellite Constellations // Handbook of Small Satellites. – Springer. – 2020. – P. 811–823.

3 HawkEye 360 is a Radio Frequency (RF) data analytics company [Электронный ресурс]. – <https://www.he360.com/> (Дата обращения: 12.08.2025).

4 **Dudás, L., Szúcs, L., Gschwindt, A.** The spectrum monitoring system by Smog-1 satellite // 2015 Conference on Microwave Techniques (COMITE), Pardubice, Czech Republic. – 2015. – P. 1–4. – <https://doi.org/10.1109/COMITE.2015.7120316>.

5 **Ellis, P., Dowla, F.** A Single Satellite Geolocation Solution of an RF Emitter Using a Constrained Unscented Kalman Filter // 2018 IEEE Statistical Signal Processing Workshop (SSP), Freiburg im Breisgau, Germany, 2018. – P. 643–647. – <https://doi.org/10.1109/SSP.2018.8450834>.

6 **Hao, C., Wan, X., Feng, D., Feng, Z., Xia, X.-G.** Satellite-Based Radio Spectrum Monitoring: Architecture, Applications, and Challenges // IEEE Network. – 2021. – Vol. 35, № 4. – P. 20–27. – <https://doi.org/10.1109/MNET.011.2100015>.

7 **Ellis, P., Rheeden, D.V., Dowla, F.** Use of Doppler and Doppler Rate for RF Geolocation Using a Single LEO Satellite // IEEE Access. – 2020. – Vol. 8. – P. 12907–12920. – <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2020.2965931>.

8 **Nguyen, N.H., Doğançay, K.** Algebraic solution for stationary emitter geolocation by a LEO satellite using Doppler frequency measurements // Proceedings of the 2016 IEEE International Conference on Acoustics, Speech and Signal Processing (ICASSP), Shanghai, China. – 20–25 March 2016. – P. 3341–3345. – <https://doi.org/10.1109/ICASSP.2016.7472296>.

9 **Ellis, P. B., Dowla, F.** Single Satellite Emitter Geolocation in the Presence of Oscillator and Ephemeris Errors // Proceedings of the 2020 IEEE Aerospace Conference, Big Sky, MT, USA, 7–14 March 2020. – P. 1–7. – <https://doi.org/10.1109/AERO47225.2020.9172600>.

10 **Kozhaya, S. E., Kassas, Z. M.** Positioning with Starlink LEO Satellites: A Blind Doppler Spectral Approach // Proceedings of the 2023 IEEE 97th Vehicular Technology Conference (VTC2023-Spring), Florence, Italy, 20–23 June 2023. – P. 1–5. – <https://doi.org/10.1109/VTC2023-Spring57618.2023.10199264>.

11 Wang, D., Qin, H., Huang, Z. Doppler Positioning of LEO Satellites Based on Orbit Error Compensation and Weighting // IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement. – 2023. – Vol. 72. – P. 1–11. – Art. No. 5502911. – <https://doi.org/10.1109/TIM.2023.3286001>.

12 Jun, W.W., Cheung, K.-M., Lightsey E.G. Improved Surface Positioning with Measurement Differences in Joint Doppler and Ranging // Proceedings of the 2023 IEEE Aerospace Conference, Big Sky, MT, USA, 4–11 March 2023. – P. 1–9. – <https://doi.org/10.1109/AERO55745.2023.10115954>.

13 Aitmagambetov, A., Butuzov, Y., Tikhvinskiy, V., Kulakayeva, A., Ongenbayeva, Z. Energy budget and methods for determining coordinates for a radiomonitoring system based on a small satellite // Indonesian Journal of Electrical Engineering and Computer Science. – 2021. – Vol. 21. – № 2. – P. 945–956.

14 Medetov, B., Kulakayeva, A., Zhetpisbayeva, A., Albanbay, N., Kabduali, T. Identifying the regularities of the signal detection method using the Kalman filter // Eastern-European Journal of Enterprise Technologies. – 2023. – Vol. 5. – P. 26–34. – <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2023.289472>.

Поступило в редакцию 05.09.25.

Поступило с исправлениями 11.11.25.

Принято в печать 05.12.25.

А. Е. Кулакаева¹, Б. Ж. Медетов², Е. А. Дайнеко³,

А. З. Айтмагамбетов⁴, *Б. А. Кожакметова⁵

^{1,3,4,5}Халықаралық ақпараттық технологиялар университеті,

Қазақстан Республикасы, Алматы қ.;

²Л. Н. Гумилев атындағы Еуразия ұлттық университеті,

Қазақстан Республикасы, Астана қ.;

³Satbayev University, Қазақстан Республикасы, Алматы қ.

05.09.25 ж. баспаға түсті.

11.11.25 ж. түзетулерімен түсті.

05.12.25 ж. басып шығаруға қабылданды.

СПУТНИКТИК РАДИОМОНИТОРИНГ ЖҮЙЕЛЕРІНДЕ РАДИОСИГНАЛДАРДЫ ҚАБЫЛДАУ ТИІМДІЛІГІН АРТТЫРУ

Бұл мақалада төмен орбиталы шағын ғарыш аппараттары негізіндегі спутниктік радиомониторинг жүйелерінде Калман сүзгісін пайдалану арқылы радиосигналды қабылдау мен қалпына келтіру тиімділігін арттыру тәсілі ұсынылған. Зерттеудің өзектілігі дәстүрлі жерүсті радиобақылау жүйелері қамту аймағы мен

сезімталдығы бойынша шектеулі болып табылатын, ауқымды және қолжетімсіз аумақтарда радиожілік спектрін тиімді бақылау қажеттілігімен түсіндіріледі. Шу мен кедергілер жағдайында гармониялық радиосигналдың қалыптасу және қабылдау үдерісін, сондай-ақ шағын ғарыш аппараты бортында өлшеулерді цифрлық өңдеу ерекшеліктерін сипаттайтын математикалық модель ұсынылған. Сандық эксперимент жүргізіліп, онда әртүрлі сигнал/шум қатынасы деңгейлерінде (3-тен –5 дБ-ге дейін) және бақылау ұзақтығы әртүрлі болған жағдайларда Калман сүзгісінің тиімділігі талданды.

Көрсетілгендей, орташа шу деңгейінде-ақ Калман сүзгісі салыстырмалы түрде қысқа қабылдау ұзақтығында шынайы және қалпына келтірілген сигнал арасындағы ұқсастық коэффициентін 0,94-тен (94 %) жоғары деңгейге жеткізуге мүмкіндік береді. Сигнал/шум қатынасы –5 дБ-ге дейін нашарлаған жағдайда да сүзгі жұмыс қабілеттілігін сақтайды, алайда қанағаттанарлық сапаға жету үшін деректердің үлкен көлемі қажет. Алынған нәтижелер ұсынылған әдістің шу әсеріне жоғары төзімділігін және оны радиоизлучение көздерін анықтау мен идентификациялау үшін қолдану мүмкіндігін растайды.

Кітті сөздер: радиомониторинг, сәулә шығару көзі, Калман сүзгісі, радиосигнал, спектр, шағын ғарыш аппарат.

А. Ye. Kulakayeva¹, B. Zh. Medetov², Ye.A. Daineko³,

A. Z. Aitmagambetov⁴, *B. A. Kozhakhmetova⁵

^{1,3,4,5}International University of Information Technology,

Republic of Kazakhstan, Almaty;

²L. N. Gumilyov Eurasian National University»

Republic of Kazakhstan, Astana.;

³Satbayev University, Republic of Kazakhstan, Almaty.

Received 11.11.25.

Received in revised form 23.10.25.

Accepted for publication 05.12.25.

IMPROVING THE EFFICIENCY OF RADIO SIGNAL RECEPTION IN SATELLITE RADIOMONITORING SYSTEMS

This paper presents an approach to improving the efficiency of reception and reconstruction of a radio signal in satellite radiomonitoring systems based on low Earth orbit (LEO) small spacecraft using the Kalman filter. The relevance of the study is driven by the need for effective monitoring of the radio frequency spectrum over vast and hard-to-reach

areas, where traditional ground-based radio control systems are limited in coverage and sensitivity. A mathematical model is proposed that describes the process of generation and reception of a harmonic radio signal under conditions of noise and interference, as well as the specifics of digital processing of measurements on board a small spacecraft. A numerical experiment was conducted to analyze the performance of the Kalman filter at various signal-to-noise ratio (SNR) levels (from 3 to -5 dB) and different observation durations.

It is shown that even at a moderate noise level, the Kalman filter makes it possible to achieve a similarity coefficient between the true and reconstructed signal of more than 0.94 (94 %) with a relatively short reception time. When the SNR conditions deteriorate to -5 dB, the filter maintains operability, although achieving acceptable quality requires a larger amount of data. The obtained results confirm the high robustness of the proposed method to noise effects and its applicability for detecting and identifying radio emission sources.

Keywords: radiomonitoring, emission source, Kalman filter, radio signal, spectrum, small spacecraft.

МРНТИ 61.51

<https://doi.org/10.48081/QVUV1417>

**Д. К. Кушанова¹, Г. С. Айткалиева²,
*М. А. Елубай³, А. Б. Исмаилова⁴**

^{1,2}Сатпаев университет, Республика Казахстан, г. Алматы;

³Торайғыров университет, Республика Казахстан, г. Павлодар;

³Humboldt-Innovation GmbH, Германия, г. Берлин;

⁴Международная образовательная корпорация, Казахская головная архитектурно-строительная академия, Республика Казахстан, г. Алматы.

¹ORCID: <https://orcid.org/0009-0002-3058-7634>

²ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-9872-6317>

³ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-6209-5215>

⁴ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-4234-0615>

*e-mail: yelubay.m@tou.edu.kz

ИНСТРУМЕНТЫ ЛИНЕЙНОГО ПРОГРАММИРОВАНИЯ ДЛЯ СТРАТЕГИЧЕСКОГО РАЗВИТИЯ НЕФТЕПЕРЕРАБОТКИ И НЕФТЕХИМИИ В КАЗАХСТАНЕ

В статье рассматриваются современные подходы к стратегическому развитию нефтепереработки и нефтехимии Республики Казахстан, а также инструменты повышения эффективности управления инвестиционными проектами в энергетической сфере. Актуальность определяется необходимостью глубокой переработки нефти, диверсификации экономики и формирования конкурентоспособного нефтеперерабатывающего и нефтехимического кластеров, энергетической безопасности страны.

Цель исследования – обосновать применение методов линейного программирования как инструмента раннего технико-экономического скрининга при отборе и оптимизации проектов. Проведён анализ отечественной и международной практики, а также рассмотрены возможности применения программных комплексов LP-моделирования Aspen PIMS и Spiral Aveva.

Результаты показывают, что линейное программирование позволяет находить оптимальный баланс между мощностями переработки, ассортиментом продукции, энергетическими и

экономическими показателями. На этой основе предложена схема бизнес-процесса раннего скрининга, где LP-моделирование выступает ключевым инструментом оценки и отбора инвестиционных проектов в энергетической, в том числе нефтехимической отраслях.

Практическая значимость работы заключается в адаптации международных подходов к условиям Республики Казахстан и в разработке предложений по формированию нормативной базы для обязательной ранней экспертизы, что повысит инвестиционную привлекательность нефтехимического и энергетического секторов.

Ключевые слова: нефтепереработка, нефтехимия, линейное программирование, инвестиционные проекты, Республика Казахстан.

Введение

Правительство Казахстана в июле 2025 года утвердило долгосрочную Концепцию развития нефтеперерабатывающей отрасли на 2025–2040 годы, задающую стратегические ориентиры для всего сектора. В соответствии с этим документом планируется более чем вдвое увеличить суммарные мощности переработки нефти – с текущих ~18 млн до 39 млн тонн в год – через модернизацию действующих НПЗ и строительство нового нефтехимического комплекса [1].

Концепция до 2040 года выступает не просто отраслевым планом, но фактически стратегической рамкой промышленной политики, определяя долгосрочные приоритеты для инвесторов и государственных программ. В этих условиях особое значение приобретает система ранней оценки инвестиционных проектов: от того, насколько эффективно на ранних этапах анализируются экономические показатели и целесообразность инициатив, зависит успешность реализации стратегических целей без избыточных затрат на последующих стадиях.

Настоящая статья анализирует существующий подход к отбору проектов в казахстанском нефтегазовом даунстриме (нефтепереработка и нефтехимия), сопоставляет его с международной практикой и предлагает меры по повышению эффективности раннего технико-экономического скрининга, позволяющего избежать лишних расходов на стадиях предТЭО и ТЭО.

Логика отбора проектов в Казахстане

В Казахстане инициирование и отбор новых проектов в нефтегазовом даунстриме преимущественно строятся на основе государственных стратегических ориентиров, а также поручений руководства страны и непосредственном контроле со стороны Министерства Энергетики. Такой «top-down» подход позволяет формировать инвестиционные инициативы в русле национальных приоритетов и долгосрочных целей развития.

Вместе с тем, характерной особенностью действующей практики является то, что разработка предварительных технико-экономических обоснований (предТЭО) зачастую стартует на раннем этапе, практически сразу после появления проектной инициативы. Это обеспечивает оперативное реагирование на стратегические задачи, однако в ряде случаев происходит с ограниченной предварительной аналитической проработкой рынка и конфигурации будущих производств.

Отсутствие развитых институтов раннего скрининга снижает возможности для объективной оценки жизнеспособности проектов на начальной стадии. Это может приводить к удлинению сроков реализации или необходимости корректировок уже в ходе детальной проработки. Подобные примеры наблюдались и в прошлом при подготовке крупных нефтехимических производств [2].

Таким образом, текущая модель инициирования проектов в Казахстане опирается на сильный государственный импульс, но требует дальнейшего усиления блока ранней аналитики и технико-экономической оценки для повышения результативности и минимизации рисков в долгосрочной перспективе.

Материалы и методы

Линейное программирование как инструмент инвестиционного планирования в нефтепереработке

LP-модели являются одними из наиболее эффективных инструментов для планирования производства и инвестиционной деятельности в энергетическом секторе, куда относятся и нефтепереработка [3].

В Казахстане на трёх нефтеперерабатывающих заводах успешно внедрён и эксплуатируется программный инструмент AVEVA Spiral, обеспечивающий планирование и оптимизацию производственных программ. Данный опыт закреплён на нормативном уровне через национальный стандарт СТ РК 3530-2020, который регламентирует применение методов линейного программирования при планировании работы НПЗ и задаёт единые требования к моделированию и валидации.

Линейные модели находят широкое применение не только в оперативном управлении производством, но и в инвестиционном планировании. Их ценность заключается в способности прогнозировать эффективность будущих производств и технологий ещё на стадии концептуальной проработки. С их помощью можно [4]:

Оценивать инвестиционные проекты: моделирование различных сценариев загрузки мощностей, глубины переработки и продуктового среза позволяет выявить наиболее устойчивые варианты к изменениям рыночной конъюнктуры и цен на сырьё.

Выбор технологий – сравнение альтернативных процессов (например, гидрокрекинг и коксование) для определения оптимальной конфигурации с учётом операционной эффективности и инвестиционной отдачи.

Проводить сценарные исследования: «что будет, если...» -линейные модели позволяют оценить влияние изменения сырья, режимов работы и конфигурации установок на оптимизацию производственных процессов.

Для того чтобы результаты имели практическую ценность, при построении моделей необходимо учитывать ряд принципиальных моментов:

Достаточный уровень детализации. Модель должна содержать так называемые «сдвиговые векторы» или аналогичные инструменты, позволяющие корректно отражать поведение установок при изменении свойств сырья и параметров работы. Без этого невозможно смоделировать будущие риски и возможности.

Правильное определение эксплуатационных пределов. Если в модель закладываются нереалистичные ограничения (например, слишком высокая глубина конверсии или недостижимая селективность), результаты могут выглядеть привлекательными, но окажутся невыполнимыми на практике.

Баланс между простотой и сложностью. Слишком упрощённая модель искажает картину, а чрезмерно детализированная может застревать в локальных оптимумах, что снижает её прикладное значение. В инвестиционном планировании требуется именно гибкость, чтобы просчитывать десятки сценариев быстро и надёжно.

Регулярная валидация. Модели должны постоянно сверяться с фактическими данными действующих заводов и международными бенчмарками. Это особенно важно для Казахстана, где накопленный опыт по крупным нефтехимическим проектам пока ограничен.

Цена ошибки. Неправильные или некорректные модели могут привести не только к аналитическим просчётам, но и к существенным финансовым потерям. Упущенная выгода от неверных решений в инвестиционном планировании исчисляется десятками и сотнями миллионов долларов.

Для расчета модели необходимы следующие исходные данные [5; 6]:

- данные о необходимом накоплении компонентов товарной продукции;
- накопление остатков компонентов товарной продукции для использования в будущих периодах;
- качество нефти: фракционный состав, плотность, содержание серы;
- исходное качество материальных потоков (компонентов);
- цены и объемы закупки/переработки сырья;
- цены и объемы производства/реализации нефтепродуктов;
- ограничения по компонентному составу нефтепродуктов;
- качество товарной продукции (спецификация);

- теплотворная способность газа и жидкого топлива;
- потребность в дополнительном топливе;
- остатки нефтепродуктов;
- нормы расхода энергоресурсов на технологических установках;
- материальные балансы установок (проектные либо расчётные, полученные в специализированных симуляторах процессов, например, Aspen HYSYS);

- график планово-предупредительных работ;
- график ввода новых установок;
- график реконструкции установок;
- нормы расхода присадок;
- нормы расхода реагентов и катализаторов;
- диапазон загрузки установок;
- цены на реагенты/присадки/катализаторы/энергоресурсы;
- запас по качеству;
- нормативы потерь и возврата;
- изменение логистики потоков.

Материальные балансы, рассчитанные по проектным данным или с использованием симуляторов, таких как Aspen HYSYS [4], служат инженерной основой, которая затем преобразуется в экономическую оценку через линейные модели (Spiral Aveva, AspenPIMS) [7; 8; 9].

Совокупные массовые и объёмные балансы сырья и продуктов формируют базу планирования капитальных вложений, при котором нефтеперерабатывающий завод представляется как сеть технологических процессов с заданной конфигурацией установок и потоками между ними [8]. В линейных моделях переменными выступают объёмы переработки, выпуск товарных продуктов и приращение мощностей; ограничения задаются балансами потоков и производственными пределами (рисунок 1); целевая функция формулируется как максимизация экономического эффекта или чистой приведённой стоимости [10].



Рисунок-1 – Схема ЛП-модели производственной системы

Таким образом, линейные модели в инвестиционном планировании выступают не просто инструментом расчёта, а механизмом управления рисками. При грамотной настройке и применении они позволяют выстраивать инвестиционные стратегии, минимизировать вероятность неудачных проектов и сосредоточить ресурсы на наиболее перспективных направлениях [11].

Результаты и обсуждение

Нулевой уровень оценки: инструменты и задачи

Для улучшения системы отбора downstream-проектов в Казахстане необходимо институциональное укрепление стадии раннего анализа. В качестве ключевой меры предлагается создать центр скрининга инвестиционных проектов в промышленности (или специализированный центр оценки проектов нефтегазохимии). Такой центр должен обладать необходимыми компетенциями и инструментарием для самостоятельного выполнения *screening*-анализа по проектным инициативам до обращения к внешним подрядчикам для пред-ТЭО и ТЭО.

Ключевым элементом такого подхода в энергетическом секторе, в том числе в нефтепереработке и нефтехимии является сочетание LP-моделирования и финансового анализа (DCF). LP-модель (Linear

Programming) позволяет смоделировать производственные потоки, конфигурацию завода и продуктовый портфель, а главное — рассчитать показатель дополнительной операционной прибыли ($\Delta EBITDA$), возникающей при появлении нового завода или установки. Эти значения становятся входными данными для финансовой модели, которая учитывает капитальные затраты, эксплуатационные расходы, налоговую нагрузку и дисконтирование. В результате формируются ключевые показатели инвестиционной эффективности: NPV, IRR и срок окупаемости [12; 13; 14; 15; 16; 17].

Таким образом, LP-модель выступает «генератором» операционных эффектов, определяя прирост EBITDA в зависимости от технологической конфигурации и рыночных условий. Эти результаты затем подшиваются в DCF-модель, которая учитывает капитальные вложения, эксплуатационные расходы, налоговую нагрузку и дисконтирование, формируя итоговые показатели NPV, IRR и срок окупаемости как показано на рисунке 2 [18; 19; 20].



Рисунок 2 – Схема расчёта эффективности проекта

Информация о финансировании

Данное исследование финансируется Комитетом науки Министерства науки и высшего образования Республики Казахстан. (Грант AP27511027 Создание экологических геополлимерных композитов с применением побочных продуктов производства прокаленного нефтяного кокса).

Выводы

Развитие энергетического сектора, в том числе нефтепереработки и нефтехимии в Казахстане, обозначенное амбициозными целями Концепции-2040 [1], требует перехода на новый уровень планирования и отбора проектов. Государственный стратегический курс задаёт ключевые ориентиры – увеличение глубины переработки, выпуск продукции нефтехимии, расширение экспортного потенциала. Однако реализация этих приоритетов должна опираться на прочный фундамент экономической целесообразности.

Принятие решений в нефтепереработке и нефтехимии должно опираться на инженерное моделирование и точные материальные балансы. Линейное программирование позволяет рассчитывать выходы установок, конфигурацию потоков и прирост операционной прибыли, а в сочетании с расчётными балансами из симуляторов формирует надёжный «цифровой фильтр» для отбора жизнеспособных проектов на ранней стадии [6].

Ранний экономический скрининг способен многократно повысить эффективность инвестиционного процесса. Это позволит сократить число неэффективных ТЭО, снизить нагрузку на бюджет и компании, ускорить реализацию действительно значимых проектов (которые благодаря качественной подготовке станут более привлекательными для инвесторов и кредиторов) и способствовать формированию культуры обоснованности инвестиций [8].

В конечном счёте, синергия стратегии и экономики – когда стратегические инициативы проходят проверку расчётами и анализом на самых ранних стадиях – обеспечит достижение целей индустриального развития Казахстана с минимальными издержками и максимальной отдачей.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1 Концепция развития нефтеперерабатывающей отрасли Республики Казахстан на 2025–2040 годы, утверждённая Постановлением Правительства Республики Казахстан от 21 июля 2025 года № 549.

2 **AACE International Recommended Practice No. 18R-97** Cost Estimate Classification System – As Applied in Engineering, Procurement, and Construction for the Process Industries. Stage-Gate International – «The Stage-Gate Model: An Overview». – [Электронный ресурс]. – chrome-extension://efaidnbmnnnibpcajpcglclefindmkaj/https://web.aacei.org/docs/default-source/toc/toc_18r-97.pdf (Дата обращения: 29.04.2025).

3 **Хохлов, А. С., Коннов, А. И., Шайдуллин, Р. А.** Комплексный подход к планированию непрерывного производства // Автоматизация в промышленности – 2015. – № 4. – С. 36–40.

4 **AspenTech.** Aspen PIMS™ – Process Industry Modeling System : Product Overview. Aspen Technology Inc., 2021. – [Электронный ресурс]. – <https://www.aspentech.com/en/products/msc/aspen-unified-pims> (Дата обращения: 29.04.2025).

5 Stage-Gate International. The Stage-Gate Model: An Overview. – [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://www.stage-gate.com> (Дата обращения: 29.04.2025).

6 **Taha, H. A.** Operations Research: An Introduction. – [Электронный ресурс]. – <http://197.156.112.159:80/handle/123456789/1657> (Дата обращения: 29.04.2025).

7 **Sinnott, R., Towler, G.** Chemical engineering design : principles, practice and economics of plant and process design. – Boston : Elsevier/Butterworth-Heinemann. – 2008. – 1245 p.

8 Global Project Tracker (brochure). [Электронный ресурс]. – <https://www.woodmac.com> (Дата обращения: 29.04.2025).

9 СТ РК 3530-2020. Планирование и оптимизация производственной программы нефтеперерабатывающих заводов с использованием методов линейного программирования. — Астана: Комитет технического регулирования и метрологии МТИ РК, 2020. – [Электронный ресурс]. – https://online.zakon.kz/Document/?doc_id=32635419 (Дата обращения: 29.04.2025).

10 **Gensarik L. L.** Reniers. Multi-Plant Safety and Security Management in the Chemical and Process Industries. – Wiley. – 2010. – 290 P. – ISBN: 978-3-527-32551-1.

11 **Lieberman, N.** Troubleshooting Process Plant Control. – Weinheim : Wiley. – 2008. – 264 P. – ISBN: 978-0-470-42514-5.

12 Process Systems Engineering. Volume 5: Energy Systems Engineering/ M. Georgiadis, E. S. Kikkinides, E. Pistikopoulos (eds.). – Weinheim : Wiley-VCH, 2008. – 330 p. – ISBN: 978-3-527-31694-6.

13 Handbook of Fuels: Energy Sources for Transportation / Elvers B. (ed.). – Weinheim : Wiley-VCH. – 2008. – 356 c.

14 Process Systems Engineering. Supply Chain Optimization / Papageorgiou, L., Georgiadis, M. (eds.). – Weinheim : Wiley-VCH. – 2008. – Vol. 3. – 348 p. ISBN: 978-3-527-31693-9.

15 **Ocic, O.** Oil Refineries in the 21st Century: Energy Efficient, Cost Effective, Environmentally Benign. Weinheim : Wiley-VCH, 2004. – 166 p. – ISBN: 978-3-527-31194-1.

16 Petroleum Economics and Engineering. Structure of the oil and gas industry / K. A. Hussein, M. A. Al-Sahlawi. – Florida, Taylor & Francis Group, Boca Raton, 2014. – Chapter 2. – P. 21–40. – ISBN: 978-1-4665-066-4.

17 **Lenahan, T.** Turnaround, Shutdown and Outage Management: Effective Planning and Step-by-step Execution of Planned Maintenance Operations. – Oxford : Butterworth-Heinemann. – 2005. – 256 p. – ISBN: 978-0-08-052527-3.

18 **Zhao, H.** Integrated model of refining and petrochemical plant for enterprise-wide optimization / H. Zhao, M. G. Ierapetritou, N. K. Shah, G. Rong // Computers & Chemical Engineering. – 2017. – Vol. 97. – P. 194–207. – <https://doi.org/10.1016/j.compchemeng.2016.11.020>.

19 **Neiro, S. M. S., Pinto, J. M.** A general modeling framework for the operational planning of petroleum supply chains // Computers & Chemical Engineering. – 2004. – Vol. 28. – №6. – P. 871–896.

20 **Шимко, О. В.** Анализ результатов финансово-хозяйственной деятельности ведущих публичных корпораций нефтегазовой отрасли после мирового финансового кризиса. – М. : Наука, 2019. – 339 с.

REFERENCES

1 Концепция развития нефтеперерабатывающей отрасли Республики Казахстан на 2025-2040 годы, утверждённая Постановлением Правительства Республики Казахстан от 21 июля 2025 года #549. [Government of the Republic of Kazakhstan — «On Approval of the Concept for the Development of the Oil Refining Industry of the Republic of Kazakhstan for 2025–2040,»] July 21. –, 2025. [primeminister.kz https://online.zakon.kz/Document/?doc_id=34992065](https://online.zakon.kz/Document/?doc_id=34992065)

2 AACE International Recommended Practice No. 18R-97 Cost Estimate Classification System – As Applied in Engineering, Procurement, and Construction for the Process Industries. Stage-Gate International – «The Stage-Gate Model: An Overview.» – [Electronic resource]. – chrome-extension://efaidnbmnnnibpcajpcglclefindmkaj/https://web.aacei.org/docs/default-source/toc/toc_18r-97.pdf (Date of access: 29.04.2025).

3 **Khokhlov, A. S., Konnov, A. I., Shaidullin, R. A.** Kompleksnyi podhod k planirovaniyu nepreryvnogo proizvodstva [An Integrated Approach to Continuous Production Planning], // Automation in industry – 2015. – №4. – P. 36–40.

4 **AspenTech.** Aspen PIMS™ – Process Industry Modeling System: Product Overview. Aspen Technology Inc., 2021. – [Electronic resource]. – <https://www.aspentech.com/en/products/msc/aspen-unified-pims> (Date of access: 29.04.2025).

5 Stage-Gate International. The Stage-Gate Model: An Overview. – [Electronic resource]. – <https://www.stage-gate.com> (Date of access: 29.04.2025).

6 **Taha, H. A.** Operations Research: An Introduction. – [Electronic resource]. – Access mode: <http://197.156.112.159:80//handle/123456789/1657> (Date of access: 29.04.2025).

7 **Sinnott, R., Towler, G.** Chemical engineering design : principles, practice and economics of plant and process design. – Boston : Elsevier/Butterworth-Heinemann, 2008. – 1245 p.

8 Global Project Tracker (brochure). [Electronic resource]. – <https://www.woodmac.com> (Date of access: 29.04.2025).

9 ST RK 3530-2020. Planirovanie i optimizaciya proizvodstvennoi programmy nethtepererabatyvaushih zavodov s ispolzovaniem metodov lineinogo programmirovaniya [Planning and Optimization of the Production Program of Oil Refineries Using Linear Programming Methods]. – Astana: Committee for Technical Regulation and Metrology of the Ministry of Technology of the Republic of Kazakhstan, 2020. – [Electronic resource]. – https://online.zakon.kz/Document/?doc_id=32635419 (Date of access: 29.04.2025).

10 **Genserik L. L.** Reniers. Multi-Plant Safety and Security Management in the Chemical and Process Industries. – Wiley. – 2010. – 290 p. – ISBN: 978-3-527-32551-1.

11 Lieberman, N. Troubleshooting Process Plant Control. – Weinheim : Wiley, 2008. – 264 p. – ISBN: 978-0-470-42514-5.

12 Process Systems Engineering. Volume 5: Energy Systems Engineering/ M. Georgiadis, E. S. Kikkinides, E. Pistikopoulos (eds.). – Weinheim : Wiley-VCH, 2008. – 330 p. – ISBN: 978-3-527-31694-6.

13 Handbook of Fuels: Energy Sources for Transportation / Elvers B. (ed.). – Weinheim : Wiley-VCH. – 2008. – 356 p.

14 Process Systems Engineering. Supply Chain Optimization / Papageorgiou, L., Georgiadis. – M. (eds.). – Weinheim : Wiley-VCH. – 2008. – Vol. 3. – 348 p. ISBN: 978-3-527-31693-9.

15 **Ocic, O.** Oil Refineries in the 21st Century: Energy Efficient, Cost Effective, Environmentally Benign. Weinheim : Wiley-VCH, 2004. – 166 p. – ISBN: 978-3-527-31194-1.

16 Petroleum Economics and Engineering. Structure of the oil and gas industry / K. A. Hussein, M. A. Al-Sahlawi. – Florida, Taylor & Francis Group, Boca Raton, 2014. – Chapter 2. – P. 21–40. – ISBN: 978-1-4665-066-4.

17 **Lenahan, T.** Turnaround, Shutdown and Outage Management: Effective Planning and Step-by-step Execution of Planned Maintenance Operations. – Oxford : Butterworth-Heinemann, 2005. – 256 p. – ISBN: 978-0-08-052527-3.

18 **Zhao, H.** Integrated model of refining and petrochemical plant for enterprise-wide optimization / H. Zhao, M. G. Ierapetritou, N. K. Shah, G. Rong

//Computers & Chemical Engineering. – 2017. – Vol. 97. – P. 194–207. – <https://doi.org/10.1016/j.compchemeng.2016.11.020>.

19 **Neiro, S. M. S., Pinto, J. M.** A general modeling framework for the operational planning of petroleum supply chains // Computers & Chemical Engineering. – 2004. – Vol. 28. – №6. – P. 871–896.

20 **Shimko, O. V.** Analiz rezultatov finansovo-hozyaistvennoi leyatelnosti vedushih publichnyh korporacii neftegazovoi otrasli posle mirovogo finansovogo krizisa [Analysis of the financial and economic performance of leading public corporations in the oil and gas industry after the global financial crisis]. – М. : Nauka. – 2019. – 339 p.

Поступило в редакцию 03.10.25.

Поступило с исправлениями 04.11.25.

Принято в печать 05.12.25.

Д. К. Кушанова¹, Г. С. Айткалиева²,

*М. А. Елубай³, А. Б. Исмаилова⁴

^{1,2}Сатпаев университеті, Қазақстан Республикасы, Алматы қ;

³Торайғыров университеті, Қазақстан Республикасы, Павлодар қ;

³Humboldt-Innovation GmbH, Германия, Берлин қ;

⁴Халықаралық білім беру корпорациясы, Қазақ бас сәулет-құрылыс академиясы, Қазақстан Республикасы, Алматы қ.

03.10.25 ж. баспаға түсті.

04.11.25 ж. түзетулерімен түсті.

05.12.25 ж. басып шығаруға қабылданды.

ҚАЗАҚСТАНДАҒЫ МҰНАЙ ӨНДЕУ ЖӘНЕ МҰНАЙ ХИМИЯСЫНЫҢ СТРАТЕГИЯЛЫҚ ДАМУЫ ҮШІН СЫЗЫҚТЫҚ БАҒДАРЛАМАЛАУ ҚҰРАЛДАРЫ

Мақалада Қазақстан Республикасында мұнай өңдеу және мұнай-химия салаларын стратегиялық дамытудың заманауи тәсілдері, сондай-ақ энергетика саласындағы инвестициялық жобаларды басқарудың тиімділігін арттыру құралдары қарастырылады. Бұл тақырып озық мұнай өңдеу, экономиканы әртараптандыру және бәсекеге қабілетті мұнай өңдеу және мұнай-химия кластерлерін дамыту қажеттілігіне, сондай-ақ елдің энергетикалық қауіпсіздігіне байланысты өзекті.

Зерттеудің мақсаты - жобаларды таңдау мен оңтайландыруда ерте техникалық және экономикалық скрининг құралы ретінде

сызықтық бағдарламалау әдістерін пайдалануды негіздеу. Отандық және халықаралық тәжірибелерді талдау жүргізіліп, Aspen PIMS және Spiral Aveva сызықтық бағдарламалау бағдарламалық пакеттерін қолдану әлеуеті талқыланды.

Нәтижелер сызықтық бағдарламалау өңдеу қуаты, өнім қоспасы және энергетикалық және экономикалық көрсеткіштер арасындағы оңтайлы тепе-теңдікті қамтамасыз ететінін көрсетеді. Осыған сүйене отырып, ерте скринингке арналған бизнес-процестің құрылымы ұсынылады, мұнда сызықтық бағдарламалау мұнай-химия салаларын қоса алғанда, энергетикадағы инвестициялық жобаларды бағалау және таңдаудың негізгі құралы ретінде қызмет етеді. Бұл жұмыстың практикалық маңыздылығы халықаралық тәсілдерді Қазақстан Республикасы жағдайларына бейімдеуде және мұнай-химия және энергетика салаларының инвестициялық тартымдылығын арттыратын міндетті ерте бағалау үшін нормативтік базаны қалыптастыру бойынша ұсыныстар әзірлеуде жатыр.

Кілтті сөздер: мұнай өңдеу, мұнай-химия, сызықтық бағдарламалау, инвестициялық жобалар, Қазақстан Республикасы.

D. K. Kushanova¹, G. S. Aitkaliyeva², *M. A. Yelubay³, A. B. Ismailova⁴

^{1,2}Satbayev University, Republic of Kazakhstan, Almaty;

³Toraighyrov University, Republic of Kazakhstan, Pavlodar

³Humboldt-Innovation GmbH, Germany, Berlin;

⁴Educational Corporation, Kazakh Leading Academy of Architecture and Civil Engineering, Republic of Kazakhstan, Almaty.

Received 03.10.25.

Received in revised form 04.11.25.

Accepted for publication 05.12.25.

LINEAR PROGRAMMING TOOLS FOR STRATEGIC DEVELOPMENT OF OIL REFINING AND PETROCHEMICAL INDUSTRIES IN KAZAKHSTAN

This article examines modern approaches to the strategic development of oil refining and petrochemicals in the Republic of Kazakhstan, as well as tools for improving the efficiency of investment project management in the energy sector. This topic is relevant due to the need for advanced oil refining, economic diversification, and the development of competitive oil refining and petrochemical clusters, as well as the country's energy security.

The aim of the study is to substantiate the use of linear programming methods as a tool for early technical and economic screening in project selection and optimization. An analysis of domestic and international practices is conducted, and the potential application of the Aspen PIMS and Spiral Aveva linear programming software packages is discussed.

The results demonstrate that linear programming enables the optimal balance between refining capacity, product mix, and energy and economic indicators. Based on this, a business process framework for early screening is proposed, where linear programming serves as a key tool for evaluating and selecting investment projects in the energy, including petrochemical, industries. The practical significance of this work lies in adapting international approaches to Republic of Kazakhstan's conditions and developing proposals for the formation of a regulatory framework for mandatory early assessment, which will increase the investment attractiveness of the petrochemical and energy sectors.

Keywords: oil refining, petrochemistry, linear programming, investment projects, Republic of Kazakhstan.

FTAMP 31.25.15

<https://doi.org/10.48081/TZWC7296>

***И. Б. Құлтан¹, Ұ. Б. Алихан², А. Жансерікқызы³,
Т. С. Торғаев⁴, З. Р. Құдайбергелі⁵**

^{1,2,3,4,5}Қорқыт Ата атындағы Қызылорда университеті,
Қазақстан Республикасы, Қызылорда қ.

¹ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-9485-0425>

²ORCID: <https://orcid.org/0009-0002-6571-0348>

³ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-6164-6775>

⁴ORCID: <https://orcid.org/0009-0006-9048-7546>

⁵ORCID: <https://orcid.org/0009-0006-6234-0520>

БИОГАЗДЫ АНАЭРОБТЫҚ АШЫТУ АРҚЫЛЫ ТҮСКЕН ЖАПЫРАҚТАРДАН АЛУ

Бұл мақалада жапырақты ағаштардың түскен жапырақтарын анаэробты ашыту арқылы биогаз өндірудің мүмкіндігі мен тиімділігі зерттеледі. Жапырақтар – көміртекке бай, бірақ азот мөлшері төмен органикалық қалдықтар. Олар дербес субстрат ретінде биогаз өндірісінде тиімсіз болғандықтан, сиыр көңімен бірге-ашыту (ко-ашыту) әдісі қолданылды. Эксперименттер әртүрлі көлемдегі және құрылымдағы үш биореакторда жүргізілді: 2 литрлік пластикалық ыдыс, OxiTop® биореакторы және 20 литрлік көлемдегі пластикалық бөтелкелер. Зерттеу барысында субстраттың ұсақталу деңгейі, инокулянт қатынасы, температуралық режимдер, рН көрсеткіштері және жалпы қатты заттардың мөлшері (TS) бақыланды. Ең жоғары биогаз (0,641 м³/кг VS) және метан шығымы (0,368 м³/кг VS) 20 литрлік реакторда алынды. Бұл үлкен көлемдегі реакторлардың микробтық белсенділік пен процесінің тұрақтылығына оң әсер ететінін көрсетті. Сонымен қатар, ко-ашыту процесінің буферлік қабілетін жақсартып, ашыту ортасының қышқылдануын болдырмады. Алынған нәтижелер түскен жапырақтарды жаңартылатын энергия көзіне айналдырудың жоғары әлеуетін көрсетіп, биогаз өндіру саласында экологиялық тұрғыдан тиімді және масштабталатын шешімдерді ұсынуға негіз болады. Ұсынылған деректер ауылдық және қала маңындағы аймақтарда ауқымды биогаз

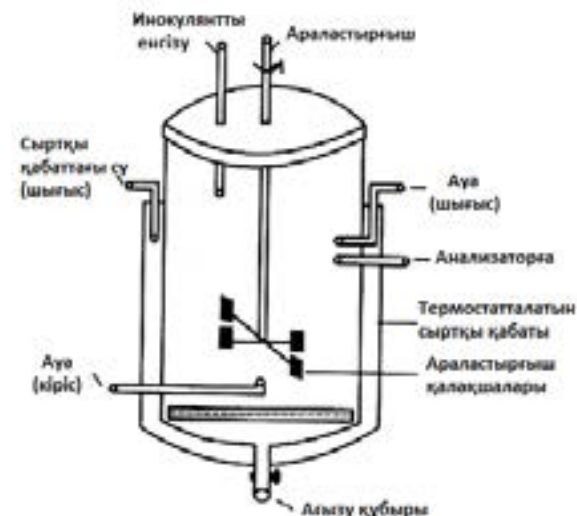
қондырғыларын әзірлеу үшін пайдаланылуы мүмкін, бұл қалдықтарды кәдеге жаратуға және жергілікті энергетиканы дамытуға ықпал етеді.

Кілтті сөздер: биогаз, анаэробты ашыту, биореактор, биохимиялық метан әлеуеті, энергетикалық тұрақтылық, органикалық қалдықтар.

Кіріспе

Жаңартылатын энергия көздері климаттың өзгеруі мен тұрақты энергетикалық шешімдерге қажеттілік мәселелерімен бетпе-бет келген сайын барған сайын маңызды бола түсуде. Анаэробты ашыту нәтижесінде өндірілетін биогаз – бұл таза және жаңартылатын энергия көзі, ол парниктік газдардың шығарылуын азайтады және тұрақты энергетикалық жүйе құруға ықпал етеді. Сонымен қатар, биогаз және басқа да жаңартылатын энергетикалық жүйелердің дамуы жергілікті экономикалық өсуге ынталандыру жасай алады және ауылды жерлерде жұмыс орындарын құруға ықпал етеді [1, 5026–5033-66.]. Жапырақты ағаштардың түскен жапырақтары да биогаз өндіру үшін субстрат ретінде пайдаланылуы мүмкін. Бұл қазіргі уақытта энергия өндіру үшін дерлік пайдаланылмайтын елеулі биогендік қалдықтар болып табылады. Бұл жапырақтарды жыл сайын жинау қажет, өйткені бұл эвтрофикация, құбырлардың немесе көше дренаждарының бітелуі, сондай-ақ шіріп жатқан жапырақтардан болатын тайғақ жолдардан туындайтын апаттар қаупін болдырмауға мүмкіндік береді [2, 355-б.].

Жапырақтардағы органикалық заттар бірлескен жүйелерінде бір субстрат түрі ретінде немесе бірқатар түрлер ретінде бірге ашытуға өңделуі мүмкін. Қазіргі уақытта бірге ашыту артықшылықты болып табылады, себебі бір-бірімен ашытылатын әртүрлі субстрат түрлері биогазды тиімді өндіру үшін қажетті көміртегі мен азоттың (C/N) дұрыс қатынасын, сілтілік қасиеттерді, жалпы қатты заттар (TS) құрамын және рН-ды қамтамасыз етеді [2, 355-б.]. Анаэробты ашыту үшін түскен жапырақтарды өңдеу биореакторының схемасы 1-суретте көрсетілген.



1-сурет – Түскен жапырақтарды анаэробты ашытуға арналған биореактордың принципіалды схемасы

Келесі маңызды қадам биогаз өндіруде қоспаның компоненттерінің оңтайлы қатынасын анықтау болып табылады [3, 173–178-66.]. Себебі, жапырақтар көміртегі/азот (C/N) қатынасының жоғары болуымен ерекшеленеді, бұл олардың ыдырауын қиындатады. Бұл метан шығымының тиімділігін төмендетеді және процесс аз өнімді болады. Басқа қалдықтармен араластыру түскен жапырақтардан биогаз алу үшін ең тиімді және болашағы зор тәсілдер болып табылады.

Ко-ашыту – бірнеше түрдегі субстраттардың бірге ашытылу процесі. Мұндай тәсіл биогаз шығымын арттыруға мүмкіндік береді, себебі микроорганизмдер әртүрлі компоненттерден қоректік заттар мен энергия көздерін пайдалана алады [4;5]. Сонымен қатар, ко-ашыту процесінің тұрақтылығын арттырып, ингибиторлық заттардан туындайтын оның бұзылу қаупін азайтады. Бұл сондай-ақ биогаз өндіруге қажетті жалпы шығындарды төмендетуі мүмкін, себебі қолжетімді жергілікті органикалық қалдықтардың кең спектрі пайдаланылады [6, 344-б.].

Материалдар мен әдістері

Түскен жапырақтарды анаэробты ашыту процесін зерттеу үшін әртүрлі ағаш түрлерінің, соның ішінде дуб, қайың және клён жапырақтары қолданылуы мүмкін. Жапырақтарды күз мезгілінде қалалық парктерден және ауылдық учаскелерден жинауға болады. Барлық жапырақтар алдын ала

қоқыс және бұтақтар сияқты бөгде ластанулардан тазартылып, кейін 1–2 см мөлшеріндегі бөлшектерге ұсақталады [7].

Түскен жапырақтарды ашыту процесінің тиімділігін бастапқы бағалау және биогаз қондырғысының жұмыс істеуінің оңтайлы параметрлерін анықтау үшін 2 литрлік пластикалық ыдыстан жасалған шағын модель пайдаланылып, эксперимент жүргізілді. Бұл модель толыққанды қондырғыны салмай-ақ алғашқы зерттеулер жүргізуге мүмкіндік берді және ашыту процесінің әртүрлі жағдайларын тексеріп, биогаз шығымын бағалауға қолданылды. Аталған эксперимент кейінірек үлкен көлемді биогаз қондырғыларын жобалаудың негізі болды [8, 46–55-бб.].

Ашыту қондырғысының схемасы 2-суретте көрсетілген. Бөтелкенің қақпағында екі канал болды, әрбірі екі жолақты клапанға қосылған, бұл реактордан ауаны шығаруға және газ құрамын анықтау үшін талдағышқа қосылуға мүмкіндік берді.



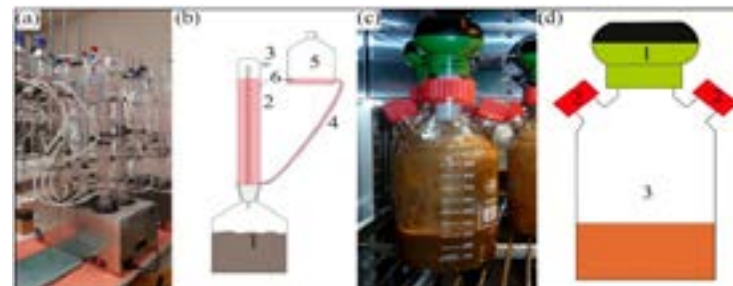
2-сурет – Ашыту үшін қондырғының схемалық диаграммасы

2-суретте анаэробты ашытуға арналған лабораториялық қондырғы көрсетілген: екі литрлік пластикалық бөтелке, қақпағында екі каналы бар. Бір канал екі жолақты клапанға қосылған, ол ауа шығаруға арналған, екіншісі биогаз құрамын өлшеу үшін газ талдағышқа қосылған. Реактор ішінде ұсақталған жапырақтар мен сиыр көңінің қоспасы орналасқан. Қондырғы герметикалық және анаэробты ашыту жағдайларын имитациялауға арналған.

ОxіТор® биореакторы мен эвдиометрі бар түскен жапырақтарды ашыту эксперименті

Екі литрлік қондырғының алғашқы эксперименттерінен кейін ашыту процесінің тиімділігін нақты бағалау және биогаз параметрлерін өлшеу үшін

ОxіТор® биореакторы мен эвдиометрі қолданылды. Бұл жүйе тек ашыту процесінің параметрлерін жоғары дәлдікпен бақылауға мүмкіндік беріп қана қоймай, сонымен қатар түскен жапырақтарды анаэробты ыдыратуға қатысатын микроорганизмдердің газ бөлу динамикасы мен белсенділігі туралы кеңірек ақпарат берді.



3-сурет – Биохимиялық метан әлеуетін (ВМР) анықтау

Биохимиялық метан әлеуетін (ВМР) анықтау эксперименті: (a) Су моншасында эвдиометр жиынтығы, (b) Эвдиометр жиынтығы: 1 – инокулянт пен субстрат қоспасы бар шыны бөтелке (реактор); 2 – газды тасымалдау үшін ішкі шыны түтікшесі бар эвдиометр түтігі; 3 – газ үлгілерін алу үшін клапан; 4 – қосылу түтігі; 5 – қысым компенсациялау резервуары; 6 – шектеу сұйықтығы. (c) Термостаттық шкафтағы ОxіТор® биореакторы. (d) ОxіТор® биореакторы: 1 – өлшеу басы; 2 – бүйірлік қосылыстар; 3 – инокулянт пен субстрат қоспасы бар реактор.

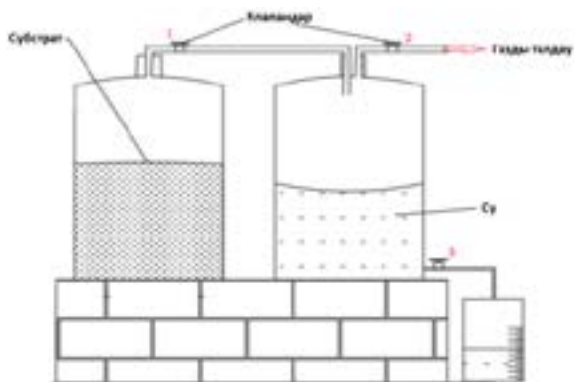
Құрғақ анаэробты ашыту (AD) технологиясында ОxіТор® биореакторлары (WTW, Вайльхайм, Германия) термостаттық инкубаторда 38 ± 1 °С температурада ВМР тестін жүргізу үшін инкубацияланды. Субстраттар мен инокулянттар реакторларға ұшпалы қатты заттардың (VS) мазмұны бойынша 1:1 қатынасында қосылды. Реакторларда жалпы құрғақ заттың (TS) мөлшері 17 %-ды құрады. Анаэробты жағдайларды қамтамасыз ету үшін реакторлар 2 минут бойы азотпен үрленді. ВМР тестілері үш қайталау бойынша жүргізілді, сонымен қатар тек инокулянт бар үш бақылау реакторы болды [9].

Эвдиометрлерде биогаз өндірісі көлемдік әдіспен өлшенді. ОxіТор® реакторларында биогаздың түзілуі әр 240 минут сайын, реактор ішіндегі қысымның өзгеруіне негізделіп бақыланды, бұл қысымды ОxіТор® өлшеу басы арқылы өлшеді (3-суретті қараңыз).

ОxіТор® биореакторы мен эвдиометрі бар эксперименттен кейін, түскен жапырақтарды ашыту процесін әрі қарай тестілеу және оңтайландыру үшін 20 литрлік екі мөлдір пластикалық бөтелкеден эксперимент өткізілді.

Бұл эксперимент периодты жүктеу әдісін қолдана отырып жүргізілді, бұл ашыту процестерін икемді бақылауға және қондырғының әртүрлі жұмыс режимдерінде динамикасын бағалауға мүмкіндік берді.

Эксперименттік қондырғы екі мөлдір пластикалық бөтелкеден тұрды, әрқайсысының көлемі 20 литр, биіктігі 39,7 см және диаметрі 25,4 см, олар реактор және су жинағыш бак ретінде қолданылды (4-сурет). Эксперименттер кезеңдік жүктеу әдісімен жүргізілді. Күнделікті талдау үшін жеткілікті биогаз мөлшерін алу мақсатында реактордың көлемі (12 л) және субстрат мөлшері ұлғайтылды. Барлық бөтелкелер субстратты жүктемес бұрын таза азотпен жуылып, M-Seal герметікімен тығыз жабылды. Реакторлардың барлық түрлері үшін инокулят ретінде ірі қара малдың нәжісі қолданылды. Инокулят пен субстраттың арақатынасы 1:4 болды. Реакторлар ыңғайлы аралықпен температурасы бақыланатын бөлмеге орналастырылып, 30 күн бойы ұсталды. Процесс температурасы 38–40 °С аралығында ұсталды, ал TS концентрациясы 8–10 % аралығында болды. Мезофильді жағдайлар қолданылды, себебі оларды ұстау жеңілірек әрі арзан, және көпшілік анаэробты реакторлар дәл осы жағдайда жұмыс істейді. Субстраттың рН мәндері сандық рН-метрмен (INSIF ELECTRONICS IE-702) анықталды. Қалған шарттар барлық реакторларда бірдей болды. Биогаздың көлемі су ауыстыру әдісімен өлшенді. Көрсеткіштер стандартты температура (0°C) және қысым (1 атм) жағдайларына сәйкес түзетілді [10, 148–159-66.].



4-сурет – Эксперименттік қондырғының схемасы

Клапан 1 газ сынамасын алу кезінде мұқият жабық күйде қалды. Биогазды күнделікті алу үшін су жинағыштан клапан 2 арқылы алынды. Су құю кезінде клапан 2 арқылы клапан 1 және 3 жабық болды. Екі 20 литрлік пластикалық бөтелкелерді периодтық жүктеу әдісімен пайдалану тәжірибесі

бұл әдістің түскен жапырақтарды ыдырату процесін жақсартуда тиімді екенін көрсетті. Периодтық жүктеу метаноген микроорганизмдерінің тұрақты белсенділігін сақтауға мүмкіндік беріп, метан газын жоғары мөлшерде алуға септігін тигізді. Эксперименттің нәтижелері бұл әдістің ірі биогаз қондырғыларында қолданылуының мүмкіндігін растап, өсімдік қалдықтарын ыдырату процесін оңтайландыру үшін жаңа деректер ұсынуда.

Нәтижелер және талқылау

Әр түрлі биореактор модельдерін пайдалану арқылы жүргізілген тәжірибелердің негізінде келесі деректер алынған: түскен жапырақтарды анаэробты ыдырату процесінде бөлінген биогаздың көлемі 1-кестеде:

1-кесте – Үш түрлі тәжірибенің талдау кестесі

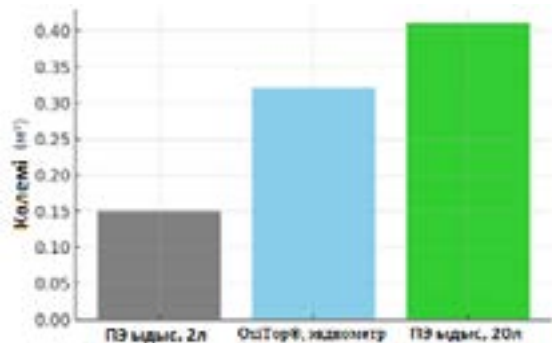
Сыни шарттар	Биогаз шығымы, мл/г	Метанның үлесі, %
ПЭ ыдыс, 2 л	Көң:жапырақ = 1:1, 38 °С	270
OxiTop®, эвдиометр	Көң:жапырақ = 1:1, 38°C, TS=17 %	310
ПЭ ыдыс, 20 л	Көң:жапырақ = 1:4, 38–40 °С, TS=10 %	380

Талдау нәтижелері бойынша биогаздың ең жоғары шығымы (380 мл/г) 20 литрлік бөтелкелерді қолданған кезде алынған, бұл оңтайлы жүктеу режимімен, көлемімен және тұрақты температуралық жағдайлармен түсіндіріледі. Реактор көлемінің және субстрат концентрациясының (TS шамамен 10 %) ұлғаюы микробтық белсенділікті жақсартып, метан шығымын арттырды.

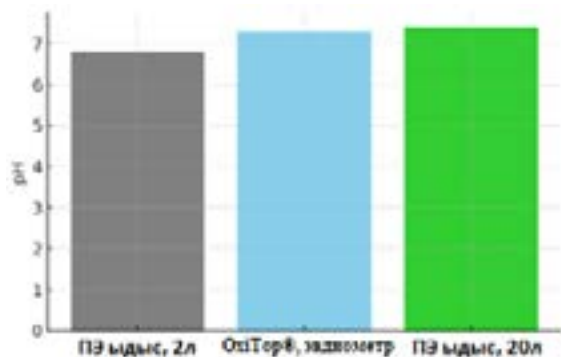
OxiTop® құрылғысымен жүргізілген эксперименттер параметрлердің жоғары дәлдігін және тұрақтылығын көрсетті, бұл биохимиялық метан потенциалын (BMP) бағалауға мүмкіндік берді. Бұл жағдайда метан шығымы 58 %-ға жетіп, әдістің тиімділігін және оны ауқымды қолдану мүмкіндігін растады.

Сонымен қатар, көңмен бірге-ашыту (ко-брожение) кезінде ортаның буферлік қабілетінің жақсарғаны, қышқылдықтың төмендегені және процестің тұрақтылығының артқаны байқалды. Бұл көң мен лигноцеллюлозалық материалдардың үйлесімінде синергетикалық әсер болатынын көрсететін бұрын жарияланған деректерді растайды.

Сондай-ақ, ірі бөтелкелі реакторларда кезеңдік жүктеу әдісін қолдану метаногендердің белсенді дамуына ықпал етеді, ортаның қышқылдануын болдырмайды және эксперимент бойы биогаздың тұрақты түзілуін қамтамасыз етеді.



5-сурет – Метан потенциалының салыстырмасы (м³/кг VS)

6-сурет – Өртүрлі қондырғылардағы pH деңгейі
5-суретте биогаздың меншікті шығымы (м³/кг VS)

Бұл график субстраттағы ұшпа заттардың (VS) массасына шаққандағы газ түзілуінің тиімділігін көрсетеді.

20 литрлік қондырғы ең жоғары меншікті өнімділікті көрсетті – 0,641 м³/кг VS,

ОxiTop® жүйесі – шамамен 0,3 м³/кг VS,

2 литрлік модель – 0,26 м³/кг VS.

Бұл нәтижелер ірі қондырғылардың органикалық заттардың ыдырауы мен микрофлораның тұрақтануы үшін қолайлы жағдай жасайтынын растайды.

6-суретте субстраттың қышқылдық деңгейі

Графикте үш түрлі эксперименттегі жиынтық биогаз шығымының салыстырмасы берілген:

– 2 литрлік реактор негізіндегі модель,

- эвдиометрлері бар ОxiTop® реакторлары,
- екі 20 литрлік пластикалық бөтелкеден тұратын қондырғы.

Ең үлкен биогаз көлемі (528 литрге дейін) 20 литрлік қондырғыда тіркелді. Бұл нәтиже жүктелген субстрат көлемінің көп болуымен және процестің тұрақты жүруімен түсіндіріледі. Кіші қондырғыларда биогаз көлемі аз болғанымен, нәтижелер меншікті көрсеткіштер тұрғысынан бағалануы тиіс.

Метанның меншікті шығымы (м³/кг VS) әртүрлі жағдайларда метан шығымының меншікті көрсеткіштері салыстырылды:

Ең жоғары метан шығымы – 0,368 м³/кг VS – 20 литрлік қондырғыда тіркелді,

ОxiTop® жүйесі шамамен 0,25 м³/кг VS көрсетті,

Ең төменгі нәтиже – 0,113 м³/кг VS – 2 литрлік модельге тиесілі.

Бұл көрсеткіш биогаздың энергетикалық әлеуеті тұрғысынан ең маңыздысы болып табылады. Нәтижелер көрсеткендей, жалпы газ көлемі аз болғанымен, ОxiTop® қондырғысы метан түзілуінің жоғары тиімділігін көрсетті.

Қорытынды

Жүргізілген зерттеулер жапырақты ағаштардың түскен жапырақтарын анаэробты ашыту процесінде субстрат ретінде пайдаланудың тиімділігін көрсетті. Биогаз бен метанның ең жоғары шығымы үлкен көлемді реакторларда кезеңдік жүктеу әдісімен алынған, бұл жылу реттелуінің тұрақтылығымен, субстраттың біркелкі таралуымен және микробтық белсенділіктің жоғарылауымен түсіндіріледі.

Түскен жапырақтарды көң сияқты органикалық қалдықтармен бірге ашыту ортаның буферлік қасиетін жақсартты, қышқылдану қаупін азайтты және метан шығымын арттырды. Бұл – бірге ашыту кезіндегі синергетикалық әсердің тәжірибе жүзінде расталғанын білдіреді.

Алынған нәтижелер өсімдік қалдықтарын өңдеп, жаңартылатын биоотын өндіруге бағытталған масштабталатын және энергия үнемдейтін шешімдерді әзірлеуге негіз бола алады. Болашақта бұл технологияның параметрлерін оңтайландыру және техникo-экономикалық тиімділігін бағалау бойынша қосымша зерттеулер жүргізу қажет.

ПАЙДАЛАНЫЛҒАН ДЕРЕКТЕР ТІЗІМІ

1 **Rahman, M. S., Majumder, M. K., Sujan, M.H.K.** «Adoption determinants of biogas and its impact on poverty in Bangladesh.» Energy Reports, Vol. 7. – P. 5026 5033. – Nov. 2021. – <https://doi.org/10.1016/J.EGYR.2021.08.027>

2 **Elif Gulsen Akbay, H.** Anaerobic Mono and Co-Digestion of Agro-Industrial Waste and Municipal Sewage Sludge: Biogas Production Potential,

Kinetic Modelling, and Digestate Characteristics. Fuel 2024. – 355. – 129468 – <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2023.129468>

3 Jena, S. P., Mishra, S., Acharya, S. K., Mishra, S. K. «An experimental approach to produce biogas from semi dried banana leaves,» Sustainable Energy Technologies and Assessments. – Vol. 19. – P. 173–178. – Feb. 2017. – <https://doi.org/10.1016/j.seta.2017.01.001>

4 Hagos, K., Zong, J., Li, D., Liu, C., Lu, X. «Anaerobic co-digestion process for biogas production: Progress, challenges and perspectives,» Renewable and Sustainable Energy Reviews. – Vol. 76. – P. 1485–1496. – Sep. 2017 – <https://doi.org/10.1016/j.rser.2016.11.184>

5 Pavi, S., Kramer, L. E., Gomes, L. P., Miranda, L. A. S. «Biogas production from co-digestion of organic fraction of municipal solid waste and fruit and vegetable waste» Bioresour Technol. – Vol. 228. – P. 362–367. – Mar. 2017 – <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2017.01.003>

6 Kunatsa T., Xia, X. «A review on anaerobic digestion with focus on the role of biomass co-digestion, modelling and optimisation on biogas production and enhancement,» Bioresour Technol, Vol. 344. – P. 126311. – Jan. 2022. – <https://doi.org/10.1016/J.BIORTECH.2021.126311>

7 DIN 38414-8; German Standard Methods for the Examination of Water, Waste Water and Sludge; Sludge and Sediments (Group S); Determination of the Amenability to Anaerobic Digestion (S 8). Deutsches Institut für Normung: Berlin, Germany. – 1985.

8 Wruss, J., Waldenberger, G., Huemer, S., Uygun, P., Lanzerstorfer, P., Müller, U., H'oglinger, O., Weghuber, J. Compositional characteristics of commercial beetroot products and beetroot juice prepared from seven beetroot varieties grown in Upper Austria, J. Food Compos. Anal. 42 (2015) 46–55. – <https://doi.org/10.1016/j.jfca.2015.03.005>

9 Leaf Those Leaves Alone! Leaving Fallen Leaves Brings Many Benefits for Nature, Says Scientist. [Electronic resource]. – <https://scienceinpoland.pl/en/news/news.79543.leaf-those-leaves-alone-leaving-fallen-leaves-brings-many-benefits-nature-says> (ac- cessed on 5 September 2024).

10 Chandra, R., Vijay, V. K., Subbarao, P. M. V., Khura, T. K. Production of methane from anaerobic digestion of jatropha and pongamia oil cakes // Appl. Energy 93 2012. – P. 148–159. – <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2010.10.049>.

05.05.25 ж. баспаға түсті.

04.07.25 ж. түзетулерімен түсті.

05.12.25 ж. басып шығаруға қабылданды.

*И. Б. Құлтан¹, У. Б. Алихан², А. Жансерікқызы³,

Т. С. Торгаев⁴, З. Р. Қудайберген⁵

^{1,2,3,4,5}Қызылординский университет имени Коркыт Ата,

Республика Казахстан, г. Кызылорда.

Поступило в редакцию 05.05.25.

Поступило с исправлениями 04.07.25.

Принято в печать 05.12.25.

ПОЛУЧЕНИЕ БИОГАЗА АНАЭРОБНЫМ СБРАЖИВАНИЕМ ОТ ОПАВШИХ ЛИСТЬЕВ

В данной статье рассматриваются возможности и эффективность анаэробного сбраживания опавших листьев лиственных деревьев для производства биогаза. Листья богаты углеродом, но имеют низкое содержание азота, что делает их неэффективными в качестве единственного субстрата для получения биогаза. Поэтому была использована методика совместного сбраживания с коровьим навозом для балансировки соотношения C/N и повышения микробной активности. Эксперименты проводились с использованием трёх типов биореакторов: пластикового контейнера объёмом 2 литра, биореактора OxiTop® и пластиковых бутылок объёмом 20 литров. Контролировались такие параметры, как размер частиц субстрата, соотношение инокулянта, температурный режим, уровень pH и содержание общих твёрдых веществ (TS). Наибольший выход биогаза (0,641 м³/кг VS) и метана (0,368 м³/кг VS) был достигнут в установке объёмом 20 литров, что свидетельствует о благоприятных условиях для микробной активности и стабильности процесса. Совместное сбраживание также улучшило буферную способность среды, предотвратило закисление и обеспечило устойчивое образование газа. Полученные результаты демонстрируют высокий потенциал превращения опавших листьев в возобновляемый источник энергии и закладывают основу для разработки экологически эффективных и масштабируемых решений в области производства биогаза. Эти данные могут быть использованы для создания крупных биогазовых установок в сельских и пригородных районах, что способствует утилизации отходов и развитию местной энергетики.

Ключевые слова: биогаз, анаэробное сбраживание, биореактор, биохимический метановый потенциал, энергетическая устойчивость, органические отходы.

*I. B. Kultan¹, U. B. Alikhan², A. Zhanserikkyzy³,

T. S. Torgaev⁴, Z. R. Kudaybergen⁵

^{1,2,3,4,5}Korkyt Ata Kyzylorda University,

Republic of Kazakhstan, Kyzylorda.

Received 05.05.25.

Received in revised form 04.07.25.

Accepted for publication 05.12.25.

PRODUCTION OF BIOGAS FROM FALLEN LEAVES THROUGH ANAEROBIC DIGESTION

This article explores the potential and efficiency of anaerobic digestion of fallen leaves from deciduous trees for biogas production. Leaves are rich in carbon but low in nitrogen, making them inefficient as a sole substrate for biogas generation. Therefore, a co-digestion method with cow manure was used to balance the C/N ratio and enhance microbial activity. Experiments were conducted using three types of bioreactors: a 2-liter plastic container, an OxiTop® bioreactor, and 20-liter plastic bottles. Parameters such as substrate particle size, inoculum ratio, temperature conditions, pH levels, and total solids (TS) content were carefully monitored. The highest biogas yield (0.641 m³/kg VS) and methane yield (0.368 m³/kg VS) were achieved in the 20-liter setup, indicating that larger-scale reactors provide better conditions for microbial activity and process stability. Additionally, co-digestion improved the buffering capacity of the medium, preventing acidification and promoting a more stable fermentation process. The obtained results demonstrate the high potential of converting fallen leaves into a renewable energy source and provide a foundation for offering environmentally efficient and scalable solutions in biogas production. These data can be used for the development of large-scale biogas plants in rural and suburban areas, contributing to waste management and the development of local energy systems.

Keywords: biogas, anaerobic digestion, bioreactor, biochemical methane potential, energy sustainability, organic waste.

МРНТИ 44.29.31

<https://doi.org/10.48081/YIWZ8387>

P. M. Машрапова¹, А. С. Барукин²,

***Б. Е. Машрапов³, А. Ж. Динмуханбетова⁴**

^{1,2,3,4}Торайғыров университет, Республика Казахстан, г. Павлодар.

¹ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-9509-5767>

²ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-5969-4030>

³ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-3018-4125>

⁴ORCID: <https://orcid.org/0009-0005-8325-9724>

*e-mail: bokamashrapov@mail.ru

ВЫБОР МАГНИТНОГО ЭКРАНА ДЛЯ ПОСТРОЕНИЯ ЗАЩИТЫ КОМПЛЕКТНОГО ТОКОПРОВОДА НА ОСНОВЕ КАТУШЕК ИНДУКТИВНОСТИ

Констатируется необходимость замены трансформаторов тока с ферромагнитным сердечником на более миниатюрные и менее металлоемкие датчики тока. Указывается, что в качестве таких датчиков могут быть использованы широко применяемые в технике катушки индуктивности. Кратко изложены достигнутые в настоящее время результаты в направлении построения защиты комплектного токопровода на основе катушек индуктивности. Отмечено, что для их защиты от влияния внешних магнитных полей нужны магнитные экраны. Представлены модели нескольких вариантов выполнения таких экранов из алюминия и электротехнической стали – П-образный сектор; П-образное кольцо (разомкнутое или замкнутое); кольцо из полосы металла. Описана методика проведения исследований их экранирующих свойств. Установлено, что наиболее эффективным является П-образный экран из алюминия в виде разомкнутого кольца. В отличие от такого же замкнутого кольца, появляется доступ катушкам индуктивности. В сравнении с П-образным сектором, он эффективнее защищает катушки индуктивности от внешних магнитных полей, а в сравнении с кольцом из полосы электротехнической стали имеет меньший вес. Приведены зависимости экранирующих свойств экрана от геометрических размеров П-образного кольца.

Ключевые слова: комплектный токопровод, катушка индуктивности, защита, магнитное поле, экран.

Введение.

Закрытые комплектные токопроводы (КТ) с тремя фазами в общей оболочке широко применяются на электрических станциях для питания элементов собственных нужд [1; 2]. Как и на любом другом электрооборудовании на них могут происходить короткие замыкания (КЗ), которые выявляются устройствами релейной защиты. В подавляющем большинстве случаев эти устройства получают информацию от трансформаторов тока (ТТ) [3, с. 42], о необходимости замены которых неоднократно указывалось в различных высокорейтинговых научных изданиях и международных конференциях [4; 5; 6; 7; 8]. При этом одной из основных причин упоминалась их металлоемкость. Для построения защиты без использования ТТ нами предложено получать информацию о токах в шинах токопровода от катушек индуктивности (КИ), располагаемых на его оболочке [9]. В [9] также предложены методика выбора параметров срабатывания защиты, ее принцип действия и алгоритм функционирования.

(В [9; 10] приведены результаты исследования магнитных полей (МП) вокруг оболочки токопровода при наличии и отсутствии соседнего токопровода. По результатам этих исследований установлено, что:

- отстраивать уставку срабатывания защиты нужно от токов двухфазного КЗ, протекающих в шинах соседнего токопровода;
- ЭДС $E_{кз}$ на выводах КИ в этом режиме можно рассчитать по формуле:

$$|E_{кз}| = |E| (k_1 \cdot m_2 + 1). \quad (1)$$

где E – вектор ЭДС, наводимой в КИ токами в шинах защищаемого токопровода (может быть рассчитана на основе закона Био-Савара-Лапласа с введением поправочных коэффициентов [10, с]); m – коэффициент, учитывающий увеличение ЭДС на выводах КИ из-за влияния указанных токов двухфазного КЗ ($m \leq 0,3$); k_1 – кратность тока двухфазного КЗ в соседнем токопроводе к току нагрузки защищаемого токопровода.

Понятно, что для уменьшения влияния этих токов, т.е. обеспечения меньшего m_1 , нужно экранировать КИ. Однако исследований о том, какими должны быть форма и габариты экрана, не приведено. Поэтому в данной работе представлен сравнительный анализ трех экранов и выбран наиболее подходящий из них.

Материалы и методы

Для проведения исследований были использованы модели токопроводов с диаметрами $D=623, 640, 700, 890$ мм, адекватность которых подтверждена экспериментально [9]. Однотипные токопроводы КТ 1 и КТ 2, как и в [9], располагались на расстоянии 60 см друг от друга (рисунок 1). Толщина стенки КТ 1 принималась 3 мм, а КТ 2–5 мм [9].

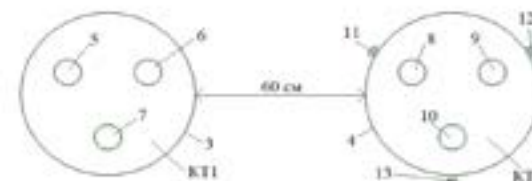


Рисунок 1 – Расположение токопроводов и катушек индуктивности

КИ 11, 12, 13 располагались на расстоянии 15 мм от оболочки 4, как показано на рисунке 1. Для экранирования КИ от МП, созданного токами в шинах КТ1 были смоделированы экраны из электротехнической стали и алюминия: П-образные в виде сектора (рисунок 2,а); в виде кольца из полосы металла разной ширины (рисунок 2,б); П-образные в виде замкнутых и разомкнутых колец (рисунок 2,в). При этом между оболочкой и П-образными экранами из стали обеспечивался зазор в 1 мм, а экран из алюминия присоединялся к ней.



Рисунок 2 – Формы экранов для защиты КИ от внешних МП: (а) П-образный в виде сектора; (б) в виде кольца из полосы металла; (в) П-образный в виде разомкнутого кольца

Диаметры экранов принимались равными $D1=D+30$ (где 30 – минимальное расстояние, в мм, от оболочки до несущей конструкции).

Толщина стенок экранов принималась 1–5 мм, ширина – 50–200 мм (рисунок 3). На рисунке 3 показано расположение КИ под экраном в виде П-образного кольца, где видно, что экран вплотную прилегает к оболочке токопровода, закрывая КИ с трех сторон. Аналогично устанавливается П-образный экран в виде сектора.

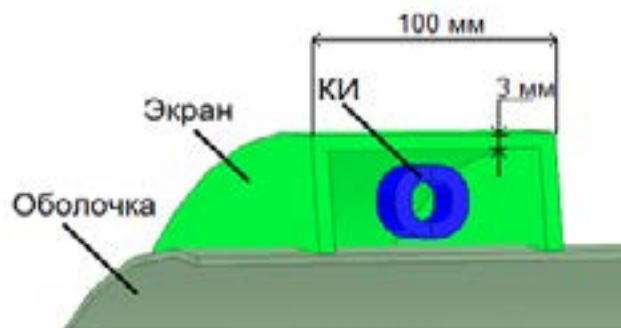


Рисунок 3 – КИ под П-образным экраном в виде кольца шириной 150 мм, опоясывающего оболочку токопровода

При проведении исследований в первую очередь было определено как влияет каждый из экранов на МП, созданное токами в шинах 8-10. Для этого при наличии и отсутствии экрана подавали токи 600 А в шины 8-10 и фиксировали ЭДС E и E_1 , наводимые на выводах КИ 11–13. Затем эти ЭДС сравнивали между собой, и определяли поправочный коэффициент $k = E_1/E$.

Далее было исследовано насколько эффективно каждый из рассматриваемых экранов защищает КИ от внешних МП. Поскольку в [9] показано, что защиту токопровода нужно отстраивать от токов двухфазного короткого замыкания (КЗ), протекающего в шинах КТ1, то и эффективность экранов оценивалась в этом режиме. Подавали токи 600 А в шины 5 и 6 КТ1 (при протекании тока в этих шинах влияние на КИ максимально) и 8–10 КТ2. На рисунке 4 показано распределение МП при протекании тока в двух фазах КТ1 и трех фазах КТ2. Фиксировали показания ЭДС на выводах КИ 11-13. Далее определяли коэффициент m_2 , аналогичный m_1 .

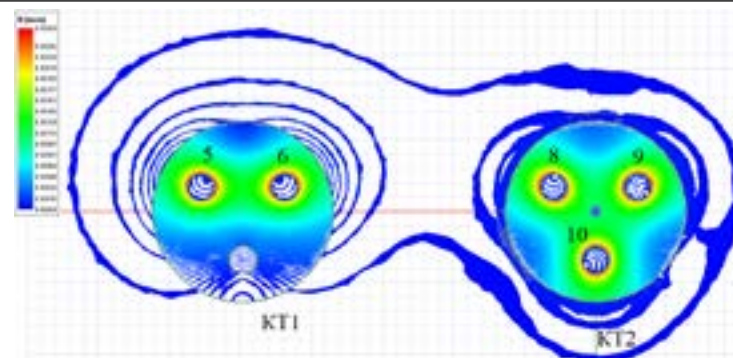


Рисунок 4 – Распределение магнитных полей вокруг токопроводов при протекании тока 600 А в шинах 5 и 6 КТ1 и шинах 6-8 КТ2 при наличии П-образного алюминиевого экрана в виде разомкнутого кольца

Результаты и обсуждение

1 Экраны из стали уменьшают индукции МП как от токов в КТ1, так и от токов в шинах КТ2, причем соизмеримо. При этом они имеют большой вес (7–40 кг в зависимости от толщины стенки и диаметра).

2 Среди экранов из алюминия наиболее подходящим оказался П-образный экран в виде разомкнутого кольца (рисунок 2, в). Разрыв открывает доступ к КИ (важно при построении защиты, поскольку экран нужно приваривать к оболочке, чтобы не было зазоров), но должен находиться с противоположной от КТ1 стороны токопровода КТ2. Вес экрана в зависимости от его размеров составляет от 1 до 9,3 кг.

3 Этот экран не только уменьшает величину индукции МП, созданного токами в соседнем токопроводе, но и выполняет роль концентратора МП, созданных токами в шинах 8–10. При этом для рассматриваемых токопроводов коэффициент k , учитывающий увеличение индукции из-за наличия экрана, зависит от толщины его стенки и ширины, но не от диаметра. На рисунке 5 представлены зависимости k от толщины стенки для ширины 50, 100, 150 и 200 мм.

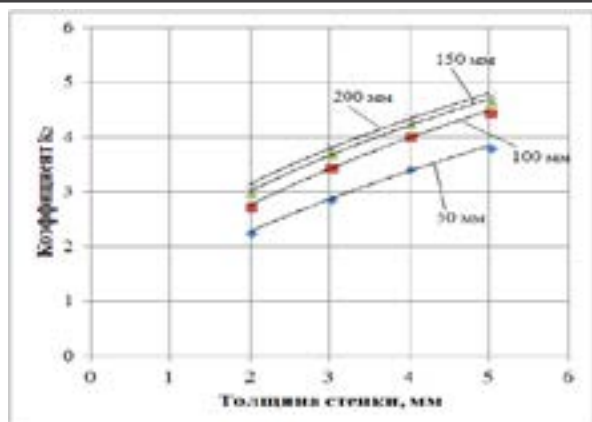


Рисунок 5 – Зависимость коэффициента k от толщины стенки экрана при его ширине 50, 100, 150 и 200 мм

4 Максимальные величины коэффициента m_2 (рассчитывается аналогично m_2 , но при наличии экрана) при ширине П-образного экрана 50–200 мм и толщине стенки 2–5 мм для рассматриваемых токопроводов представлены на рисунке 6. Отметим, что m_2 , как и k , не зависит от диаметра экрана.

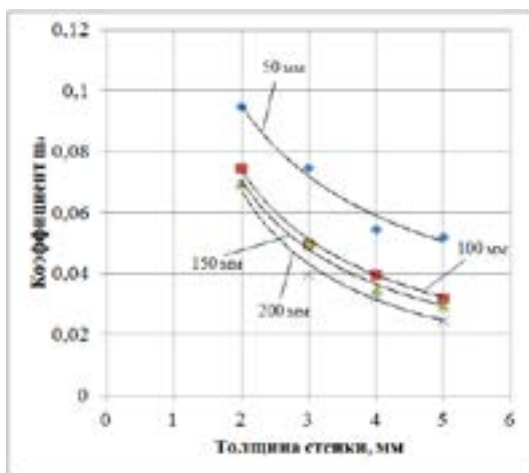


Рисунок 6 – Зависимость коэффициента m_2 от толщины стенки экрана при его ширине 50, 100, 150 и 200 мм

Выводы

Предложенный П-образный экран в виде разомкнутого кольца позволяет снизить не менее, чем в три раза, влияние на катушки индуктивности МП, созданных токами двухфазного КЗ в шинах соседнего токопровода. При этом его вес не превышает 9,3 кг, и обеспечивается доступ к катушкам. Полученные зависимости коэффициентов m и k от геометрических параметров экрана позволяют легко подобрать его с нужными характеристиками.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

- 1 **Дорошев, К. И.** Токопроводы и шинопроводы для электростанций и подстанций [Текст]. – М. : Энергоатомиздат, – 1996. – 289 с.
- 2 **Васильев, А. А., Крючков., И. П., Наяшкова, Е. Ф.** Электрическая часть станций и подстанций [Текст]. – М. : Энергоатомиздат, 1990. – 576 с.
- 3 **Андреев, В. А.** Релейная защита и автоматика систем электроснабжения [Текст]. – М. : Высшая школа, 2006. – 639 с.
- 4 **Дьяков, А. Ф., Ишкин, В. Х., Мамиконянц, Л. Г., Семенов, В. А.** Электроэнергетика мира в начале XXI столетия (по матер. 39-й сессии СИГРЭ, Париж) [Текст] // Энергетика за рубежом. – М.: ЗАО Научно-техническая фирма «Энергопрогресс», – 2004. – Вып. 4–5. – 176 с.
- 5 **Kojović, L. A.** Non-conventional instrument transformers for improved substation design [Text] // CIGRE Session 46. – B3–101. – 2016.
- 6 **Kletsel, M. Ya.** Basics of construction of relay protection on reeds [Text] // Modern Development of Relay Protection and Power System Automation Systems. – Ekaterinburg, 2013. – P. 1–10.
- 7 **Kletsel, M., Zhantlesova, A., Mayshev, P., Mashrapov, B., Issabekov, D.** New filters for symmetrical current components [Text] // International Journal of Electrical Power and Energy Systems, 2018. – Vol. 101. – P. 85–91.
- 8 **Goryunov V., Kletsel M., Mashrapov B., Mussayev Zh., Talipov O.** Resource-saving current protections for electrical installations with isolated phase busducts [Text] // Alexandria Engineering Journal, 2021. – Vol. 61. – Issue. – 8 – P. 6061-6069.
- 9 **Kletsel M., Mashrapov, B., Mashrapova, R.** Protection without current transformers for electrical installations with three-phase bus ducts [Text] // Electric Power Systems Research, – 2025. – Vol. 240. – 111246.
- 10 **Машрапов, Б. Е., Мусаев, Ж. Б.** Определение индукции магнитного поля снаружи оболочки трехфазного токопровода [Текст] // Труды университета. – 2021. – №3. – С. 241–245.

REFERENCE

1 **Doroshev K. I.** Tokoprovody i shinoprovody dlya elektrostantsiy i podstantsiy [Bus Ducts and Busbars for Power Plants and Substations] [Text]. – Moscow: Energoatomizdat, – 1996. – 289 p.

2 **Vasil'ev A. A., Kryuchkov I. P., Nayashkova E. F.** Elektricheskaya chast' stantsiy i podstantsiy [Electrical Part of Power Plants and Substations] [Text]. – Moscow: Energoatomizdat, – 1990. – 576 p.

3 **Andreev, V. A.** Relejnaya zashchita i avtomatika sistem elektrosnabzheniya [Relay protection and automation of power supply systems] [Text]. – M.: Vysshaya shkola, 2006. – 639 p.

4 **Diakov, A. F, Ishkin, V. Kh, Mamikonians, L. G, Semenov V. A.** Elektroenergetika mira v nachale XXI stoletia (po mater 39-i sessii SIGRE Parizh) [Electric power industry of the world at the beginning of the XXI century (based on the materials of the 39th session of CIGRE, Paris)] [Text] // Energy Abroad. – M.: CJSC Scientific and technical firm «Energoprogress». – 2004. – Issue 4–5. – 176 p.

5 **Kojojić, L. A.** Non-conventional instrument transformers for improved substation design [Text] // CIGRE Session 46. – B3–101. – 2016.

6 **Kletsel, M. Ya.** Basics of construction of relay protection on reeds [Text] // Modern Development of Relay Protection and Power System Automation Systems. – Ekaterinburg, 2013. – P. 1–10.

7 ~~xxjx~~ **New filters for symmetrical current components** [Text] // International Journal of Electrical Power and Energy Systems, 2018. – Vol. 101. – P. 85–91.

8 **Goryunov V., Kletsel M., Mashrapov B., Mussayev Zh., Talipov O.** Resource-saving current protections for electrical installations with isolated phase busducts [Text] // Alexandria Engineering Journal, 2021. – Vol. 61. – Issue 8 – P. 6061–6069.

9 **Kletsel M., Mashrapov B., Mashrapova R.** Protection without current transformers for electrical installations with three-phase bus ducts [Text] // Electric Power Systems Research, – 2025. – Vol. 240. – 111246.

10 **Mashrapov B. E., Musaev Zh. B.** Opredelenie induksii magnitnogo polya snaruzhi obolochki trekhfaznogo tokoprovoda [Determination of the magnetic field induction outside the enclosure of a three-phase bus duct] [Text] // Trudy universiteta. – 2021. – No. 3. – P. 241–245.

Поступило в редакцию 29.09.25.

Поступило с исправлениями 29.09.25.

Принято в печать 05.12.25.

Р. М. Маширапова¹, А. С. Барукин²,

**Б. Е. Маширапов³, А. Ж. Динмуханбетова⁴*

^{1,2,3,4}Торайғыров университеті,

Қазақстан Республикасы, Павлодар қ.

29.09.25 ж. баспаға түсті.

29.09.25 ж. түзетулерімен түсті.

05.12.25 ж. басып шығаруға қабылданды.

ИНДУКТИВТІК КАТУШКАЛАРДА НЕГІЗДЕЛГЕН ЖИНАҚЫ ТОКӨТКІЗГІШТІ ҚОРҒАУДЫ ҚҰРУҒА АРНАЛҒАН МАГНИТТІК ЭКРАНДЫ ТАҢДАУ

Ферромагниттік өзекшелі дәстүрлі ток трансформаторларын көлемі анағұрлым шағын, құрылымы қарапайым және металды аз қажет ететін заманауи ток датчиктеріне ауыстырудың өзекті қажеттілігі нақты түрде атап көрсетіледі. Осындай датчиктердің орнына техника саласында кеңінен қолданыс тапқан индуктивтік катушкаларды пайдалануға болатыны айтылады. Индуктивтік катушкаларға негізделген жинақы токөткізгішті қорғау жүйесін құру бағытында қазіргі кезде қол жеткізілген маңызды нәтижелер қысқаша мазмұндалып берілген. Сонымен бірге, мұндай катушкаларды сыртқы магнит өрістерінің зиянды әсерінен сенімді қорғау үшін арнайы магниттік экрандар қолдану қажеттілігі көрсетіледі. Алюминийден және электротехникалық болаттан дайындалған бірнеше экран үлгілері ұсынылған: П-тәрізді сектор; П-тәрізді сақина (ашық немесе тұйық түрінде); сондай-ақ металл жолағынан жасалған тұтас сақина. Олардың экрандау қасиеттерін зерттеу әдістемесі егжей-тегжейлі сипатталады. Зерттеу нәтижесінде ең тиімдісі алюминийден жасалған П-тәрізді ашық сақина екендігі анықталды. Ол тұйық сақинаға қарағанда катушкаларға еркін қол жеткізуге мүмкіндік береді, П-тәрізді секторға қарағанда жақсырақ әрі сенімдірек қорғайды, ал электротехникалық болат сақинасына қарағанда салмағы әлдеқайда жеңіл П-тәрізді сақинаның геометриялық өлшемдеріне байланысты экрандау қасиеттерінің тәуелділіктері де келтірілген.

Кілтті сөздер: жинақы токөткізгіш, индуктивтік катушка, қорғау, магнит өрісі, экран.

R. M. Mashrapova¹, A. S. Barukin²,

*B. E. Mashrapov³, A. Zh. Dinmukhanbetova⁴

^{1,2,3,4}Toraighyrov University,

Republic of Kazakhstan, Pavlodar.

Received 29.09.25.

Received in revised form 29.09.25.

Accepted for publication 05.12.25.

SELECTION OF A MAGNETIC SHIELD FOR CONSTRUCTING PROTECTION OF AN ENCLOSED BUS DUCT BASED ON INDUCTANCE COILS

The necessity of replacing current transformers with ferromagnetic cores by more compact and less metal-consuming current sensors is emphasized. It is indicated that inductance coils, widely used in engineering, can serve as such sensors. The currently achieved results in developing protection of enclosed bus ducts based on inductance coils are briefly summarized. It is noted that magnetic shields are required to protect them from the influence of external magnetic fields. Several models of such shields made of aluminum and electrical steel are presented: a U-shaped sector; a U-shaped ring (either open or closed); and a ring made from a metal strip. The methodology for studying their shielding properties is described. It has been established that the most effective is an aluminum U-shaped shield in the form of an open ring. Unlike a similar closed ring, it provides access to the inductance coils. Compared with a U-shaped sector, it more effectively protects the inductance coils from external magnetic fields, and compared with a ring made from an electrical steel strip, it has a lower weight. The dependencies of the shielding properties of the shield on the geometric dimensions of the U-shaped ring are presented.

Keywords: enclosed bus duct, inductance coil, protection, magnetic field, shield.

FTAMP 621.311.4

<https://doi.org/10.48081/КНАМ4324>

***О. Д. Меурбекова¹, А. Н. Бергузинов², А. Г. Калтаев³**

¹Қожа Ахмет Ясауи атындағы Халықаралық қазақ-түрік университеті, Қазақстан Республикасы, Түркістан қ.

^{2,3}Торайғыров университеті, Қазақстан Республикасы, Павлодар қ.

¹ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-0949-1443>

²ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-6954-8259>

³ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-1684-3347>

*e-mail: oksana_120183@mail.ru

ҚОСАЛҚЫ СТАНЦИЯ ЖАБДЫҚТАРЫН ДИАГНОСТИКАЛАУДЫҢ ЗАМАНАУИ ӘДІСТЕРІНІҢ ТИІМДІЛІГІН БАҒАЛАУ

Энергетика саласының қарқынды дамуы жағдайында электр энергиясын беру және тарату процестерінде қосалқы станция жабдықтарының сенімділігі мен тиімділігіне қойылатын талаптар артып келеді. Осыған байланысты, жасасырын ақауларды ерте анықтау, қалдық ресурстарды бағалау және апаттардың алдын алу мақсатында диагностика әдістерін жетілдіру өзекті мәселе болып табылады.

Бұл мақалада қосалқы станция жабдықтарын диагностикалаудың заманауи әдістері қарастырылады. Негізгі назар термовизиялық бақылау, энергетикалық кәсіпорындарда қолдануға арналған заманауи технологиялар қарастырылады, оған ішінара разрядтарды талдау, дірілдік диагностика, заттардың интернеті (IoT) негізіндегі интеллектуалды жүйелер және сандық егіздер (digital twins) жатады. Әрбір әдістің артықшылықтары мен әлсіз тұстары талданып, олардың өндірістік тәжірибедегі тиімділігі бағаланады.

Сонымен қатар, нақты уақыт режимінде деректерді талдау және апатты жағдайларды болжау үшін машиналық оқыту алгоритмдерін қолдануға негізделген болжамды техникалық қызмет көрсету жүйесін енгізу мәселелері қарастырылады. Зерттеу шеңберінде сенсорлық деректерді жинау, сандық ұқсастарды пайдалану және модельдеу негізінде жасанды интеллект

алгоритмдерін оқытуға бағытталған интеграцияланған бақылау және диагностика жүйесі ұсынылған.

Зерттеу нәтижелері қарастырылған жүйенің ақауларды ерте диагностикалауда, техникалық қызмет көрсетуді оңтайландыруда және пайдалану шығындарын қысқартуда тиімді екенін дәлелдейді. Сонымен қатар, апаттық жағдайлардың жиілігін азайту, персоналдың еңбек қауіпсіздігін күшейту, жоспарлы жөндеуден жабдықтың нақты күйіне негізделген қызмет көрсетуге көшу және оның пайдалану мерзімін ұзарту мүмкіндіктері жан-жақты қарастырылған.

Кілтімі сөздер: диагностика және бақылау, цифрлық технологиялар, жасанды интеллект, болжамды қызмет көрсету, энергия жүйесінің сенімділігі.

Кіріспе

Технологияның дамуымен жабдықтарды диагностикалау әдістері айтарлықтай өзгерістерге ұшырады. Егер бұрын негізгі тәсіл дәстүрлі құралдарды қолдана отырып, визуалды тексеру және мерзімді өлшеу болса, бүгінде цифрлық және интеллектуалды жүйелер кеңінен таралуда. Ішінара разрядтарды бақылау, термовизиялық тексеру, тербелістерді талдау және жасанды интеллектті қолдану жабдықтың күйін дәл және жедел бағалаудың жаңа мүмкіндіктерін ашады.

Қосалқы станциялық жабдық – бұл электр жүйесіндегі электр энергиясын түрлендіруді, бөлуді және бақылауды қамтамасыз ететін құрылғылар мен механизмдер кешені. Қосалқы станциялардың негізгі мақсаты электр кернеуі мен ток параметрлерін ұзақ қашықтыққа тиімді беру және одын әрі тұтынушылар арасында тарату үшін өзгерту болып табылады [1].

1 суретте қосалқы станция жабдығының диагностикасы істен шығудың алдын алу мен электр желісінің сенімділігін қамтамасыз ететіні көрсетілген. Қосалқы станциялар электр энергиясын түрлендіру және таратуда маңызды рөл атқарады. Сондықтан олардың жабдығының істен шығуы электрмен жабдықтаудың үзілуіне, қондырғылардың зақымдануына және елеулі қаржылық шығындарға әкелуі мүмкін. Ақауларды дер кезінде анықтау, қалдық ресурсты дұрыс болжау және заманауи диагностикалық әдістерді пайдалану аталған тәуекелдерді едәуір төмендетуге мүмкіндік береді [2]. Диагностиканың негізгі міндеттерінің бірі – жасырын ақауларды ерте анықтау, олар ұзақ уақыт бойы байқалмай қалуы мүмкін, бірақ уақыт өте келе елеулі зақымға айналады.



1-сурет – Қосалқы станциялық жабдықты диагностикалау

Диагностиканың тағы бір маңызды аспектісі – жабдықтың қалдық ресурсын болжау. Заманауи технологиялар ағымдағы ақауларды жазып қана қоймай, сонымен қатар олардың қауіпсіз қызмет ету мерзімін анықтау үшін компоненттердің күйін талдауға мүмкіндік береді. Бұл әсіресе өз шегінде жұмыс істейтін немесе ұзақ уақыт жұмыс істейтін жабдық үшін өте маңызды. Бұл тәсіл техникалық қызмет көрсету мен жөндеуді алдынала жоспарлауға мүмкіндік береді, бұл апаттық үзілістер мен тоқтап қалу мүмкіндігін айтарлықтай азайтады.

Диагностика сонымен қатар төтенше жағдайлардың азаюына да ықпал етеді [3]. Диагностиканың экономикалық маңызы зор: жоспарлы қызмет көрсетуден жабдықтың жағдайына қарай қызмет көрсетуге көшу жөндеу және жаңарту шығындарын азайтады. Жабдыққа шынымен қажет болған кезде ғана қызмет көрсетіледі, бұл қажетсіз тексерулер мен ауыстыру шығындарын азайтады. Сонымен қатар, ақауларды ерте анықтау және істен шығудың алдын алу жабдықтың тоқтап қалуына және тұтынушылардың шығындарын өтеуге байланысты қаржылық шығындарды азайтады. Сонымен қатар, диагностика қызметкерлердің қауіпсіздігін арттырады. Автоматтандырылған бақылау жүйелерін пайдалану жоғары вольтты жабдыққа жиі физикалық қол жеткізу қажеттілігін азайтады. Сондай-ақ, төтенше жағдайлардың жиілігін төмендету қызметкерлер үшін қауіпсіз еңбек жағдайларын жасауға ықпал етеді [4].

Материалдар мен әдістері.

Қолданылатын диагностикалық әдістер:

1 Термовизиялық тексеру-оқшаулау мен контактілерді диагностикалау үшін қызып кету аймақтарын анықтау.

2 Ішінара разрядтарды мониторинг – жоғары вольтты оқшаулауда пайда болатын ақауларды ерте диагностикалау әдісі.

3 Дірілді талдау – механикалық тораптар мен агрегаттардың жұмыс күйін бағалауға мүмкіндік береді.

4 IoT негізіндегі интеллектуалды жүйелер – бұлтты платформаларды пайдалану арқылы жабдықты нақты уақыт режимінде бақылауды қамтамасыз етеді.

5 Сандық ұқсастар (Digital Twins) – жабдықтың жұмыс параметрлерін модельдеу және ықтимал ақауларды болжау құралы.

Өртүрлі әдістерді қолдану апаттардың шығындары мен тәуекелдерін азайту арқылы техникалық қызмет көрсетуді оңтайландыруға мүмкіндік береді.

Қосалқы станция жабдықтарын диагностикалаудың заманауи әдістері электр желілерінің сенімді және үздіксіз жұмысын қамтамасыз етуде маңызды рөл атқарады.

Термиялық тексеру – диагностиканың кең таралған әдістерінің бірі болып табылады. Бұл әдіс нашар контактілерді, оқшаулаудың зақымдалуын немесе шамадан тыс жүктемені көрсетуі мүмкін қызып кету аймақтарын анықтауға мүмкіндік береді. Жылу түсіргіштер инфрақызыл сәулеленуді тіркейді, бұл жабдықты өшірмей, ықтимал қауіпті аймақтарды анықтауға мүмкіндік береді.

Діріл диагностикасы трансформатордың салқындату жүйелері мен ажыратқыш қозғалтқыштары сияқты жабдықтың механикалық түйіндерінің күйін бағалау үшін қолданылады. Дірілдің жоғарылауы мойынтіректердің тозуын, роторлардың теңгерімсіздігін немесе механикалық ақауларды көрсетуі мүмкін. Діріл талдауын қолдану ақауларды анықтап қана қоймай, жабдықтың қалдық ресурсын болжауға мүмкіндік береді.

Заттардың тұтынушылық интернетіне негізделген жүйелер (IoT) негізделген бақылау жүйелері энергетикада танымал бола бастады. Бұл жүйелерге нақты уақыт режимінде жұмыс параметрлері туралы деректерді жинайтын негізгі жабдық элементтеріне орнатылған сенсорлар кіреді. Ақпарат бұлтты платформаларға жіберіледі, онда ол ауытқуларды анықтау үшін талданады. (IoT) қолдану диагностиканың жеделдігін едәуір арттыруға және физикалық тексеру қажеттілігін азайтуға мүмкіндік береді.

Қосалқы станция жабдықтарын диагностикалаудың заманауи әдістері жабдықтың күйін бағалаудың дәлдігін, жылдамдығын және ыңғайлылығын

арттыруға бағытталған. Ол әдісті енгізу жабдықтарға техникалық қызмет ету кезінде орын алатын шығындарды азайтуға, жабдықтың қызмет ету мерзімін ұзартуға және барлық электр желісінің сенімділігін арттыруға ықпал етеді [5].

Қосалқы станция жабдықтарына болжамды қызмет көрсету электр желілерінің сенімділігі мен тұрақтылығын қамтамасыз етуде шешуші рөл атқарады.

Деректерді бақылау.

Деректерді бақылау бүкіл жүйенің жұмысының негізі болып табылады. Бұл компонент қосалқы станция жабдықтарының күйі туралы ақпаратты нақты уақыт режимінде жинауға, беруге және сақтауға жауап береді. Бұл зерттеу жұмысы аясында мыналарды іс-шаралар іске асырылды:

Датчиктер жүйесі.

Қосалқы станцияның негізгі қондырғыларына – трансформаторларға, ажыратқыштарға, шиналарға және кабельдік желілерге сенсорлар орнатылды. Датчиктер ток, кернеу, температура, діріл және ішінара разрядтар сияқты жұмыс параметрлерін үздіксіз тіркейді.

Заттар интернетіне (IoT) негізделген инфрақұрылым.

Сенсорлардан алынған деректерді жинау үшін IoT инфрақұрылымы енгізілді. Ол деректерді беру желілерін, серверлерді және сақтау жүйелерін қамтиды. Мұндай тәсіл параметрлерді автоматты түрде бұлттық немесе жергілікті жадқа жеткізуге мүмкіндік береді.

Бұлтты және жергілікті серверлер.

Жиналған ақпаратты сақтау және өңдеу үшін бұлтты серверлер пайдаланылды. Бұл шешім жүйенің масштабталуын қамтамасыз етіп, алынған деректерді талдау мен жедел қолжетімділікті жеңілдетеді [6].



2-сурет – Жабдықтың күйін диагностикалау жүйесінің схемасы

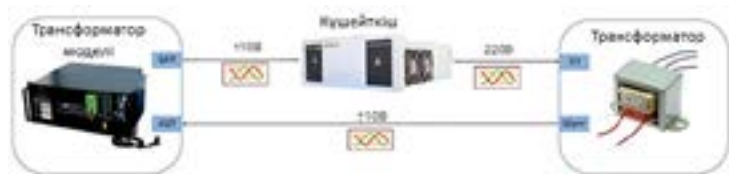
Сандық ұқсас (цифровой двойник) – нақты физикалық объектіні, жүйені немесе процесті бейнелейтін виртуалды модельі, олардың нақты уақыттағы сипаттамалары мен динамикасын қайталайды. Сандық ұқсастықтардың негізгі міндеті-диагностика, болжау, процестерді оңтайландыру және шешім қабылдау үшін физикалық объектінің жұмысын имитациялау. Энергетикада цифрлық ұқсастықтар қосалқы станциялар жабдықтарының жағдайын бақылау және талдау үшін кеңінен қолданылады.



3-сурет – Сандық ұқсастық схемасы

Сандық ұқсастықтың жұмыс істеу қағидаты (3 сурет) – физикалық объектіден алынған деректерді нақты уақыт режимінде виртуалды модельге біріктіруге негізделеді. Қосалқы станцияның жабдықтары үшін мұндай модель трансформаторлар, ажыратқыштар, кабельдер, шиналар және басқа да элементтердің техникалық сипаттамаларын қамтып қана қоймай, сонымен қатар жүктеме, температура және әртүрлі сыртқы әсерлерден туындайтын динамикалық өзгерістерді де көрсетеді.

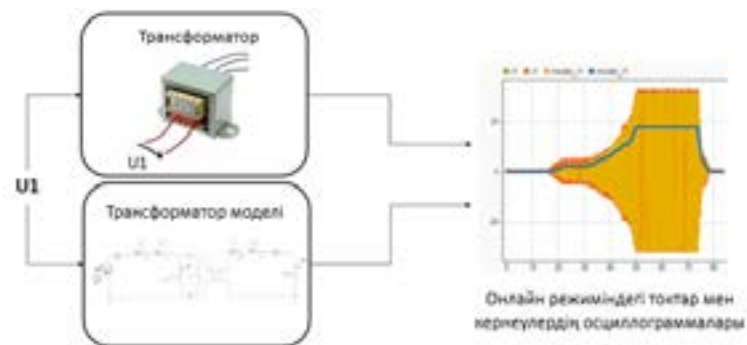
Сандық ұқсас құрылғыға орнатылған сенсорлардан алынған мәліметтерді пайдаланады. Датчиктер ток, кернеу, температура, діріл, окшаулаудың жағдайы мен ішінара разрядтар сияқты негізгі параметрлерді тіркейді. Жиналған ақпарат нақты уақыт режимінде жүйеге беріледі және виртуалды модельді үздіксіз жаңартуға қолданылады. Осы тәсіл арқылы сандық ұқсастық физикалық объект пен оның виртуалды бейнесі арасындағы толық сәйкестікті және синхрондауды қамтамасыз етеді (4 сурет).



4-сурет – Жабдықты қосу схемасы

Сандық ұқсастық екі негізгі компоненттен тұрады: нақты орналасу және виртуалды (сандық) орналасу. Нақты орналасу – бұл сенсорлар мен деректерді жинау жүйелері орнатылған физикалық жабдық немесе жүйе. Бұл датчиктерден алынған мәліметтер өңделеді және виртуалды орналасуға жіберіледі.

Сандық макет өз кезегінде нақты жабдықтың математикалық моделі болып табылады. Бұл модель физикалық заңдар, эмпирикалық мәліметтер және объектінің мінез-құлқын сипаттайтын инженерлік есептеулер негізінде жасалады. Сандық орналасу компоненттердің сипаттамаларын, олардың өзара әрекеттесуін, климаттық жағдайлар мен жүктемелер сияқты сыртқы әсерлерді, сондай-ақ ықтимал ақаулар мен олардың салдарын ескереді. Виртуалды орналасу ақауларды диагностикалау, ақауларды болжау және жабдықтың жұмыс режимдерін оңтайландыру сияқты әртүрлі тапсырмаларды орындау үшін пайдаланылады [7]. Виртуалды орналасу сирек сәтсіздіктерге байланысты деректерді жасауға және оны диагностика мен болжамдардың дәлдігін жақсартатын Машиналық оқыту үлгілерін үйрету үшін пайдалануға мүмкіндік береді (5 сурет).



5-сурет – Жабдықты қосу схемасы

Сандық ұқсастық дербес болжау жүйесі ретінде де жұмыс істей алады, жабдықтың күйі туралы ақпаратты оны өшірмей немесе күрделі сынақтарсыз қамтамасыз етеді. Мысалы, егер жабдық жұмыс істеп тұрған кезде датчиктер температураның немесе токтың қалыптан тыс жоғарылауын жазып алса, сандық ұқсастық бұл деректерді талдап, оның жүктеменің қалыпты өзгеруіне немесе ақаулықтың дамуына байланысты екенін анықтай алады. Бұл техникалық қызмет көрсету қажеттілігі немесе жұмыс параметрлерін өзгерту туралы жедел шешім қабылдауға мүмкіндік береді [8].

Сандық ұқсастық пайдалану қосалқы станция жабдықтарын пайдаланудың айтарлықтай артықшылығын қамтамасыз етеді, мысалы техникалық қызмет көрсету қажет болған жағдайда ғана жүргізілетін болжамды қызметке көшу арқылы техникалық қызмет көрсету шығындарын азайтуға көмектеседі [9;10].

Машиналық оқыту моделін оқыту-бұл алгоритмді деректердегі заңдылықтарды тануға және осы білімді аномалияларды жіктеу, болжау немесе анықтау сияқты тапсырмаларды орындау үшін пайдалануға үйрететін процесс. Қосалқы станция жабдықтарына болжамды қызмет көрсету контекстінде модельді оқыту ақаулықтарды анықтауға, сәтсіздіктерді болжауға және тарихи немесе жасалған деректер негізінде техникалық қызмет көрсету туралы шешім қабылдауға мүмкіндік береді [11].

Нәтижелер және талқылау

Біз модельді оқыту процесін жабдықтың қалыпты күйін де, ақаулардың әртүрлі түрлерін де қамтитын өкілдік деректер жиынтығын құрудан бастадық. Ол үшін біз трансформаторлар, ажыратқыштар және кабельдер сияқты қосалқы станция компоненттерінің күйін көрсететін токтар, кернеулер, тербелістер, температура және басқа параметрлердің деректерін қолдандық. Біздің жобамыздың негізгі деректер көздері нақты деректер және сандық ұқсастық модельдеу болды. Біз жүйенің ағымдағы параметрлері мен жұмыс режимдерін түсіре отырып, қосалқы станция жабдықтарына орнатылған сенсорлар арқылы нақты деректерді жинадық. Алайда, нақты жағдайда байқау қиын болатын сирек немесе күрделі ақаулар үшін біз сандық ұқсастыққа негізделген модельдеуді жүзеге асырдық. Бұл тәсіл модельді оқыту мүмкіндіктерін кеңейте отырып, мәліметтер жиынтығын қажетті сценарийлермен толықтыруға мүмкіндік берді.

```

import random

class Transformer:
    def __init__(self, max_voltage=140, min_voltage=100):
        self.max_voltage = max_voltage
        self.min_voltage = min_voltage
        self.voltage = 0
        self.energy_on = True

    def analyze_voltage(self):
        self.voltage = random.randint(0, 100) # generate random voltage
        if self.voltage > self.max_voltage:
            self.energy_on = False
            print("Перенапряжение опасно! Проверьте нагрузку!")
        elif self.voltage < self.min_voltage:
            print("Низкое напряжение!")
        else:
            print("Напряжение в норме.")

    def get_status(self):
        if self.energy_on:
            return "Энергия включена"
        else:
            return "Энергия выключена"

    def reset(self):
        self.energy_on = True
        self.voltage = 0

transformer = Transformer()

for _ in range(10):
    transformer.analyze_voltage()
    print(f"Status: {transformer.get_status()}")

```

6-сурет – Жасанды интеллектті оқыту

6 суретте олардың сапасын қамтамасыз ету және талдауға дайындық үшін деректерді мұқият өңдеу жүргізілді. Бұл кезеңде нәтижелерді бұрмалайтын жалған сигналдарды болдырмау үшін шу, өткізіп алған мәндер және ақауларға байланысты емес ауытқулар алынып тасталды. Токтар мен кернеулер сияқты параметрлерді бір масштабқа келтіру арқылы деректер қалыпқа келтірілді, бұл бір параметрдің екіншісіне үстемдік етуіне жол бермеді. Деректердің үлкен көлемін өңдеуді оңтайландыру үшін біз негізгі компоненттер әдісі (PCA) сияқты өлшемді азайту әдісін қолдандық. Бұл бізге деректердің негізгі сипаттамаларын сақтай отырып, модельді оқытуды жеделдетуге мүмкіндік берді.

```

Напряжение в норме.
Статус энергии в подстанции: Энергия выключена
Напряжение: 221V

Ошибка: Напряжение слишком низкое!
Статус энергии в подстанции: Энергия выключена
Напряжение: 56V

Ошибка: Напряжение слишком низкое!
Статус энергии в подстанции: Энергия выключена
Напряжение: 177V

Напряжение слишком высокое и энергия выключена.
Статус энергии в подстанции: Энергия выключена
Напряжение: 268V

Напряжение в норме.
Статус энергии в подстанции: Энергия выключена
Напряжение: 254V

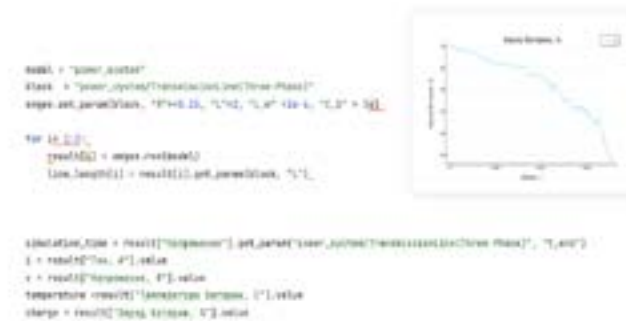
Ошибка: Напряжение слишком низкое!
Статус энергии в подстанции: Энергия выключена
Напряжение: 94V

Напряжение в норме.
Статус энергии в подстанции: Энергия выключена
Напряжение: 182V

```

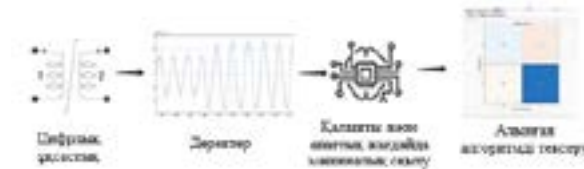
7-сурет – Қосалқы станция жүйесіндегі логтар

Модельдің дәлдігі мен сенімділігін арттыру мақсатында бастапқы деректер үш бөлікке жіктелді: оқыту, тест және валидация үлгілері. Оқыту үлгісі негізгі бөлік ретінде алынып, деректердің шамамен 70–80 %-ын құрады (7 сурет). Бұл деректер тікелей модельді үйрету үшін пайдаланылды. Тестілеу үлгісі жалпы деректердің 10–15 %-ын қамтып, оқыту барысында модель көрмеген жаңа мәліметтерде оның сапасын бағалауға мүмкіндік берді. Сонымен қатар, деректердің тағы 10–15 % валидация үшін бөлініп, гиперпараметрлерді оңтайландыру және қайта үйрену (overfitting) қаупін азайту үшін қолданылды. Осындай бөліну әдісі оқыту, тестілеу және валидация арасындағы тепе-теңдікті сақтап, модельдің барлық кезеңдерінде тұрақты әрі жоғары нәтижелерге қол жеткізуге жағдай жасады (8 сурет).



8-сурет – Қосалқы станциядағы диск батареяларының күйін бақылау

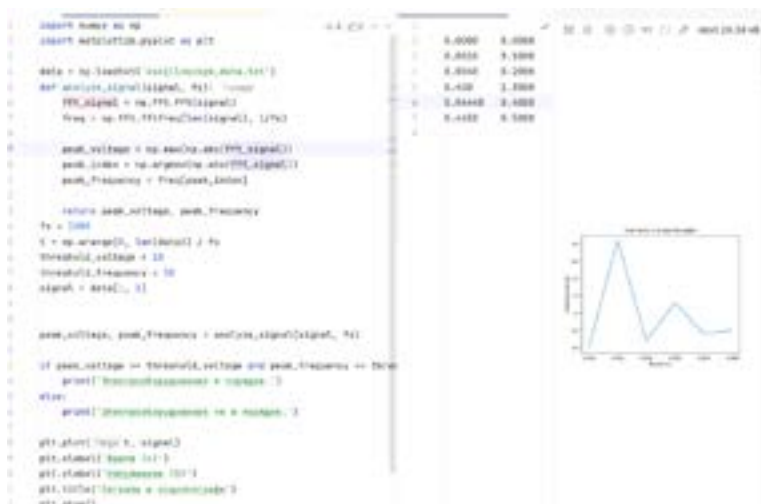
Болжалды техникалық қызмет көрсету мәселелерін шешу үшін уақыт қатарларын талдауға және көптеген параметрлермен жұмыс істеуге жарамды бірнеше Машиналық оқыту модельдері қолданылды. Ақауларды жіктеу және күйлерді болжау үшін анықтамалық векторлық әдісті (SVM) таңдады, өйткені ол біздің деректермен жұмыс істеу кезінде жоғары дәлдікті көрсетті.



9-сурет – Мониторинг жүйесінің жұмыс істеу принциптері

Уақыт қатарларын талдау үшін біз параметрлер тарихын ескеруге және нақты болжамдар жасауға мүмкіндік беретін қайталанатын нейрондық желілерді (RNN) қолдандық. Сондай-ақ, жіктеу және болжау тапсырмалары үшін градиентті күшейту модельдері (XGBoost, LightGBM) енгізілді, ал ауытқуларды анықтау үшін автокодерлер (Autoencoders) қолданылды. Модельдерді оңтайландыру үшін олардың гиперпараметрлері максималды дәлдік пен тұрақтылыққа қол жеткізу үшін кросс-валидацияны қолдана отырып реттелді. Оқыту барысында модельдің болжамдарының дәлдігін бағалау үшін қате функциясы пайдаланылды. Бұл функцияны минимизациялау мақсатында кіріс деректері (ток, кернеу, діріл сияқты параметрлер) мен мақсатты белгілер (мысалы, қалыпты жұмыс жағдайы немесе ақау) арасындағы оңтайлы байланыстарды анықтау үшін модельдің

ішкі параметрлері реттелді (9 сурет). Мұндай тәсіл модельге деректердегі күрделі заңдылықтарды тиімді талдауға және нақты әрі сенімді болжамдар жасауға мүмкіндік берді. Пайдаланудың қарапайымдылығы үшін олар операторларға графиктерге, кестелерге және автоматты ескертулерге қол жеткізуге мүмкіндік беретін нәтижелерді визуализациялауды жүзеге асырды. Бұл тәсіл қосалқы станциялардың сенімділігін арттыру және техникалық қызмет көрсету кестесін оңтайландыру арқылы аномалияларды жедел анықтауға, ақауларды жіктеуге және жабдықтың істен шығуын болжауға мүмкіндік береді.



10-сурет – Журналдар мен сигналдарды талдау арқылы электр жабдықтарын бақылау

Аталған кітапханалар MATLAB мүмкіндіктеріне ұқсас функционалдықты береді, бірақ оларды тікелей Python ортасында қолдануға болады. Бұл үлкен көлемдегі деректерді өңдеуде икемділік пен ыңғайлылықты қамтамасыз етеді. NumPy кітапханасының көмегімен деректер массивтерін жылдам өңдеп, әртүрлі математикалық операциялар, сигналдарды сүзгілеу және басқа да есептеулерді орындауға мүмкіндік бар. Мысалы, осциллографтан алынған токтар мен кернеулердің сигналдарын импорттауға және одан әрі талдау үшін түрлендіруге болады (10 сурет). Біз электр жабдықтарының күйін диагностикалау үшін маңызды болып табылатын жиіліктерді, амплитудаларды, RMS және басқа сигнал сипаттамаларын есептей аламыз.

Matplotlib кітапханасы өңделген деректерді визуализациялауға мүмкіндік береді. plt.plot пайдалана отырып, инженерлерге жабдықтың күйін қашықтан талдауға көмектесетін сигналдардың, спектрлердің және басқа визуалды көріністердің уақыт кестесін құра аламыз. Бұл әсіресе келесі параметрлерді бақылау үшін пайдалы:

Шамадан тыс жүктемені немесе қысқа тұйықталуды көрсетуі мүмкін токтардың жоғарылауы.

Трансформаторлардың немесе шиналардың ақауларына байланысты кернеудің ауытқуы.

Аппараттық ақаулықтарды көрсететін гармоника немесе шудың болуы.



11-сурет – Деректерді құру

Python және AI енгізу арқылы бейнеленген осциллограф 11-суретте сигналдары бізге электр жабдықтарының күйін қашықтан бақылауға мүмкіндік береді. Бұл мониторингтің жаңа мүмкіндіктерін ашады, өйткені мамандар аппараттық құрал орнатылған объектіден тыс жерде нақты уақыттағы деректерді талдай алады.

Жүйенің маңызды бөлігі-нақты жабдықтың виртуалды көшірмесі болып табылатын сандық ұқсастық. Сандық ұқсастық бақылау жүйесімен біріктірілген және қашықтан басқарылады. Ол физикалық жабдыққа әсер етпестен жұмыс сценарийлерін модельдеуге және гипотезаларды тексеруге мүмкіндік беретін жұмыс процестері мен аппараттық күйлерді қайталайды.

Операторлар нақты уақыттағы деректерді көрсететін визуалды интерфейс арқылы сандық ұқсастықтармен әрекеттесе алады. Бұл AI-ді оқытуға және техникалық қызмет көрсету туралы шешім қабылдауға көмектеседі. Нақты уақыттағы бақылау жүйесі көптеген сенсорлар арқылы электр жабдықтарының негізгі параметрлерін бақылайды.

ЖИ терең оқыту

Жүйенің негізгі элементі-терең жасанды интеллектті оқыту. Ол үшін тарихи деректер де, цифрлық егіз жасаған деректер де қолданылады. Терең оқыту жасанды интеллектке мүмкіндік береді:

– аномалияларды табу – визуалды талдау арқылы байқалмайтын қалыпты жұмыс режимінен ауытқуларды анықтау.

– ақауларды жіктеу – оқшаулаудың бұзылуы, шамадан тыс жүктеме немесе қысқа тұйықталу сияқты түрлі ақау түрлерін айқындау.

– істен шығуды болжау: істен шығу ықтималдығын және компоненттердің қалдық қызмет ету мерзімін есептеңіз.

ЖИ оқыту бірнеше кезеңдерде жүреді:

1 Журналдардан және сандық егіздерден мәліметтер жинау.

2 Деректерді тазарту және қалыпқа келтіру үшін алдын-ала өңдеу.

3 Тендестірілген деректер үлгісінде нейрондық желілерді оқыту.

4 Болжамдардың дәлдігін жақсарту үшін модельді тестілеу және оңтайландыру.

Модельді оқыту аяқталған соң, жасанды интеллект мониторинг жүйесіне енгізіледі. Ол нақты уақыт режимінде деректерді талдап, операторларға жабдықтың жағдайы бойынша диагностика және болжам нәтижелерін ұсынады.

Біз болжамды қызмет көрсету жүйесінің барлық негізгі компоненттерін объектіге бағытталған бағдарламалауды (ОББ) қолдана отырып, жасанды интеллект (ЖИ) басқаратын бірыңғай базаға біріктірдік. Бұл интеграцияланған платформа жабдықты бақылауды, диагностиканы, релелік қорғанысты және журналдарды талдауды қамтиды. ЖИ нақты уақыт режимінде сенсорлардан деректерді алады, оларды талдайды және диагностикалық нәтижелерді, анықталған ақауларды және сәтсіздік болжамдарын тіркейтін журналдар жасайды. Жүйенің негізгі артықшылығы – жасанды интеллект маңызды жағдайларда өздігінен шешім қабылдай алады. Атап айтқанда, ол ірі ақаулар кезінде релелік қорғанысты іске қосу, техникалық қызмет көрсетуге қатысты ұсынымдар беру немесе жабдықтың жұмыс параметрлерін түзету сияқты әрекеттерді орындайды. Бұл адам факторын барынша азайтып, электр желісінің жалпы сенімділігін арттыруға мүмкіндік береді.

Қорытынды. Қосалқы станция жабдықтарына арналған болжамды қызмет көрсетудің жетілдірілген жүйесі – жасанды интеллект, объектіге бағытталған бағдарламалау, цифрлық егіздер, нақты уақыттағы мониторинг және релелік қорғаныс сияқты алдыңғы қатарлы технологияларды біріктіретін кешенді шешім болып табылады. Ол жабдықтың жағдайын сенімді диагностикалауды, ықтимал ақауларды алдын ала болжауды және шешім қабылдау үдерісін автоматтандыруды қамтамасыз етеді. ЖИ басқаратын бірыңғай деректер сенсорлардан түсетін үлкен көлемдегі ақпаратты өңдеп, релелік қорғанысты іске қосу, техникалық қызмет көрсетуді оңтайландыру немесе жұмыс параметрлерін түзету секілді жедел әрекеттерді жүзеге асыруға мүмкіндік береді. Мұндай тәсіл электр желілерінің қауіпсіздігін, сенімділігін және тиімділігін арттыру үшін ерекше маңызды.

Бағдарламалық архитектурада объектіге бағытталған тәсілді қолдану жүйенің модульділігін, масштабталуын және басқару жеңілдігін қамтамасыз етеді. Бұл болашақта жүйені жаңа міндеттерге бейімдеу және дамыту үшін үлкен артықшылық береді. Сандық егіздер арқылы әртүрлі жұмыс режимдерін, соның ішінде сирек кездесетін немесе қауіпті апаттық жағдайларды модельдеуге болады, бұл өз кезегінде нақты өмірде қолжетімсіз деректер негізінде ЖИ-ды оқытуға мүмкіндік береді.

IoT технологияларын қолдану деректерді нақты уақыт режимінде беруді, MATLAB-пен ықпалдасуды және нәтижелерді айқын визуализациялауды қамтамасыз етеді, соның арқасында талдау нәтижелері мамандар үшін түсінікті әрі қолжетімді болады. Сонымен қатар, ЖИ жүйесі автоматты түрде журналдарды құрып, оларды өңдей алады және диагностика, болжам мен ұсынымдар бойынша нақты қорытындылар ұсынады, бұл адам факторына тәуелділікті азайтады.

Осылайша, жасалған жүйе тек диагностика мен басқарудың заманауи құралы ғана емес, сонымен қатар жабдықты белсенді қызмет көрсетумен қамтуды және төтенше жағдайлардың алдын алуды көздейтін жаңа буын электр желілерін қалыптастырудың негізі болып саналады. Мұндай шешімді енгізу энергиямен жабдықтау сенімділігін жоғарылатуға, пайдалану шығындарын азайтуға және энергетика саласының тұрақты дамуына жол ашады.

ПАЙДАЛАНЫЛҒАН ДЕРЕКТЕР ТІЗІМІ

1 **Михеев, Г. М.** Цифровая диагностика высоковольтного электрооборудования. – М. : ДМК-Пресс. – 2017.

2 **Сазыкин, В. Г., Кудряков, А. Г., Нетребко, С. А., Пронь, В. В.** Перспективы повышения эффективности электроэнергетического комплекса Кубани. Электрогериатрия – совершенствование эксплуатации изношенного электрооборудования. – Краснодар: КубГАУ, 2012.

3 **Михеев, Г. М.** Электростанция и электрические сети. Диагностика и контроль электрооборудования. – М. : Додека XXI век, 2010.

4 **Ящур, А. И.** Система технического обслуживания и ремонта энергетического оборудования: Справочник. – М. : НЦ ЭНАС. – 2008.

5 **Фролов, О., Шершнев, Ю., Гуревич, М., Вайнзихер, Б., Столяров, Е.** Собственные нужды подстанций. Источники бесперебойного питания. – Новости электротехники, № 6 (72). – 2011.

6 **Электротехнический справочник: Электротехнические изделия и устройства / Под общей ред. В. Г. Герасимова и др. – 8-е изд., испр. и доп. – М. : Издательство МЭИ. – 2008.**

- 7 **Ляндау, Ю. В.** Обзор применения технологий искусственного интеллекта в электроэнергетической отрасли. «ИННОВАЦИИ И ИНВЕСТИЦИИ». № 8. 2023
- 8 Тревор Хасты, Роберт Тибширани, Джером Фридман. Элементы статистического обучения: анализ данных, выводы и прогнозы. 2-е издание. – Нью-Йорк : Springer, – 2009.
- 9 **Кевин, П. Мёрфи, Т.** «Машинное обучение: вероятностный подход» Кембридж, Массачусетс: MIT Press. – 2012.
- 10 Этем Алпайдин. «Введение в машинное обучение» 4-е издание. – Кембридж, Массачусетс: MIT Press, – 2020
- 11 **Чжан Чжун, Цзан, Е.** «Мониторинг на основе облаков и Интернета вещей». Лондон: Springer, – 2021.

REFERENCES

- 1 **Mihev, G. M.** Cifrovaya diagnostika vysokovol'tnogo elektrooborudovaniya [Digital diagnostics of high-voltage electrical equipment]. – М.: DMK-Press, 2017.
- 2 **Sazykin, V. G. Kudryakov, A. G. Netrebko, S. A., Pron', V. V.** Perspektivy povysheniya effektivnosti elektroenergeticheskogo kompleksa Kubani. Elektrogeriatriya – sovershenstvovanie ekspluatatsii iznoshennogo elektrooborudovaniya [Prospects for improving the efficiency of the Kuban electric power complex. Electrogeriatrics – improving the operation of worn-out electrical equipment]. – Krasnodar: KubGAU. – 2012.
- 3 **Mihev, G. M.** Elektrstaniya i elektricheskie seti. Diagnostika i kontrol' elektrooborudovaniya [Electrical station and electrical networks. Diagnostics and control of electrical equipment]. – М. : Dodeka XXI vek, – 2010.
- 4 **Yashchura, A. I.** Sistema tekhnicheskogo obsluzhivaniya i remonta energeticheskogo oborudovaniya: Spravochnik [Energy equipment maintenance and repair system]. – М.: NC ENAS. – 2008.
- 5 Frolov, O., Shershnev, Yu., Gurevich, M., Vajnzihir, B., Stolyarov, E. Sobstvennye nuzhdy podstancij. Istochniki bescperebojnogo pitaniya. – [Own substation needs. Uninterruptible power supplies. – // Novosti elektrotekhniki [Electrical engineering news]. – № 6 (72), – 2011.
- 6 Elektrotekhnicheskij spravochnik: V 4 t. Elektrotekhnicheskie izdeliya i ustrojstva [6 Electrotechnical reference book: Electrical products and devices] / Pod obshej red. V. G. Gerasimova i dr. – 8-е izd., ispr. i dop. – М. : Izdatel'stvo MEI. – 2008.
- 7 **Lyandau, YU. V.** Obzor primeneniya tekhnologij iskusstvennogo intellekta v elektroenergeticheskoy otrasli [Overview of the application of artificial intelligence technologies in the electric power industry]. // «ИННОВАЦИИ И ИНВЕСТИЦИИ». – № 8. – 2023

- 8 Trevor Hasti, Robert Tibshirani, Dzhером Fridman. Elementy statisticheskogo obucheniya: analiz dannyh, vyvody i prognozy [Elements of statistical learning: data analysis, conclusions and forecasts]. 2-е izdanie. – N'yu-York: Springer, – 2009.
- 9 **Kevin, P. Myorfi, T.** «Mashinnoe obuchenie: veroyatnostnyj podhod» [Machine learning: a probabilistic approach]. – Kembridzh, Massachusets: MIT Press. – 2012.
- 10 **Etem Alpajdin.** «Vvedenie v mashinnoe obuchenie» [Introduction to Machine learning] Kembridzh, Massachusets: MIT Press, 4-е izdanie, 2020
- 11 **CHzhan CHzhun, Czan E.** «Monitoring na osnove oblakov i Interneta veshchej» [Cloud-based and Internet-of-Things monitoring] London: Springer, – 2021.

30.09.25 ж. баспаға түсті.

01.10.25 ж. түзетулерімен түсті.

05.12.25 ж. басып шығаруға қабылданды.

**О. Д. Меирбекова¹, А. Н. Бергузин², А. Г. Калтаев³*

¹Международный казахско-турецкий университет имени Ходжи Ахмеда Ясави, Республика Казахстан, г. Туркестан;

^{2,3}Торайғыров университет, Республика Казахстан, г. Павлодар.

Поступило в редакцию 30.09.25.

Поступило с исправлениями 01.10.25.

Принято в печать 05.12.25.

ОЦЕНКА ЭФФЕКТИВНОСТИ СОВРЕМЕННЫХ МЕТОДОВ ДИАГНОСТИКИ ОБОРУДОВАНИЯ ПОДСТАНЦИЙ

В условиях стремительного развития энергетической отрасли предъявляются повышенные требования к надежности и эффективности оборудования подстанций, играющего ключевую роль в передаче и распределении электрической энергии. В связи с этим актуальной задачей является совершенствование методов диагностики, направленных на раннее выявление скрытых дефектов, прогнозирование остаточного ресурса и предотвращение аварийных ситуаций.

В данной статье рассматриваются современные методы диагностики оборудования подстанций. Основное внимание уделено термовизионному контролю, анализу частичных разрядов, вибродиагностике, интеллектуальным системам на основе Интернета вещей (IoT) и цифровым двойникам (digital twins). Проведен сравнительный анализ преимуществ и недостатков

данных методов, а также оценена их практическая значимость для энергетических предприятий.

Кроме того, рассматриваются вопросы внедрения предиктивного технического обслуживания, основанного на анализе данных в режиме реального времени и использовании алгоритмов машинного обучения для прогнозирования аварийных ситуаций. В рамках исследования предложена интегрированная система мониторинга и диагностики, включающая сбор данных с датчиков, использование цифровых двойников и обучение алгоритмов искусственного интеллекта на основе моделирования.

Полученные результаты демонстрируют эффективность предложенной системы в выявлении неисправностей на ранних стадиях, оптимизации технического обслуживания и снижении эксплуатационных затрат. Детально рассматриваются такие аспекты, как снижение частоты аварий, повышение безопасности персонала, переход от планового ремонта к техническому обслуживанию по состоянию, а также продление срока службы оборудования.

Ключевые слова: диагностика и контроль, цифровые технологии, искусственный интеллект, предиктивное обслуживание, надежность энергосистем.

*O. D. Meirbekova¹, A. N. Berguzinov², A. G. Kaltayev³

¹Akhmet Yassawi International Kazakh-Turkish University,
Republic of Kazakhstan, Turkistan;

^{2,3}Toraighyrov University, Republic of Kazakhstan, Pavlodar.

Received 30.09.25.

Received in revised form 01.10.25.

Accepted for publication 05.12.25.

EVALUATION OF THE EFFECTIVENESS OF MODERN METHODS OF DIAGNOSTICS OF SUBSTATION EQUIPMENT

In the context of the rapid development of the energy sector, increasing demands are placed on the reliability and efficiency of substation equipment, which plays a key role in the transmission and distribution of electrical energy. Consequently, improving diagnostic methods aimed at early fault detection, residual resource estimation, and accident prevention has become a critical issue.

This paper examines modern methods for diagnosing substation equipment. The primary focus is on thermal imaging inspection, partial discharge analysis, vibration diagnostics, intelligent systems based on the Internet of Things (IoT), and digital twins. A comparative analysis of these methods is conducted, evaluating their advantages, disadvantages, and practical significance for energy enterprises.

Additionally, the paper explores the implementation of predictive maintenance, which leverages real-time data analysis and machine learning algorithms for accident forecasting. The study proposes an integrated monitoring and diagnostic system that includes sensor data collection, digital twin utilization, and artificial intelligence training based on modeling.

The obtained results demonstrate the effectiveness of the proposed system in early fault detection, maintenance optimization, and operational cost reduction. Key aspects such as reducing failure rates, enhancing personnel safety, transitioning from scheduled maintenance to condition-based servicing, and extending the lifespan of equipment are examined in detail.

Keywords: diagnostics and monitoring, digital technologies, artificial intelligence, predictive maintenance, power system reliability.

<https://doi.org/10.48081/UJUR9426>

С. С. Молдахметов¹, *А. Е. Анарбаев², А. П. Кислов³

Б. Т. Абдрахманов⁴, А. С. Аябаев⁵

¹Северо-Казахстанский университет имени М. Козыбаева,
Республика Казахстан, г. Петропавловск;

^{2,3,4,5}Торайғыров университет, Республика Казахстан, г. Павлодар.

¹ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-2432-7983>

²ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-6890-8005>

³ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-4816-8008>

⁴ORCID: <https://orcid.org/0009-0002-7817-1275>

⁵ORCID: <https://orcid.org/0009-0006-1515-1233>

*e-mail: alibek_anarbaev@mail.ru

ГЕНЕРАТОР ПРЕДНАМЕРЕННЫХ ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫХ ПОМЕХ НА ОСНОВЕ ИСКРОВОГО РАЗРЯДНИКА

Статья посвящена разработке мобильного устройства для генерации преднамеренных электромагнитных помех. Принцип работы основан на искровом разряднике и индуктивном элементе, что позволяет создавать регулируемые электромагнитные импульсы. Диапазон рабочих частот достигает 2,5 ГГц, а напряженность электрического поля может составлять до 5 кВ/м. Генератор оснащен высоковольтным импульсным DC-DC преобразователем и питается от портативного аккумулятора.

Экспериментально установлено, что генерируемые помехи способны оказывать значительное воздействие на функционирование линий передачи данных, выполненных с применением неэкранированной витой пары категории 5е. Проведенный анализ осциллограмм показал, что наведенная помеха имеет форму затухающего синусоидального сигнала, параметры которого могут изменяться за счет регулировки ширины искрового промежутка и конфигурации индуктора. Регулировка искрового промежутка позволяет изменять частоту и амплитуду излучения. Классификация спектра излучаемых помех позволила отнести устройство к среднечастотному типу генераторов.

Представленный генератор, отличающийся малыми габаритами и автономностью, предназначен для проведения мобильных испытаний радиоэлектронной аппаратуры на электромагнитную устойчивость. Такие мобильные решения критически важны для повышения безопасности сетевых систем в реальных условиях эксплуатации, обеспечивая точные данные.

Ключевые слова: электромагнитные помехи, искровой разрядник, витая пара категории 5е, индуктор, преднамеренные помехи.

Введение

Электромагнитные угрозы представляют собой значительную опасность в современном мире, где технологии развиваются с невероятной скоростью. Эти угрозы могут исходить от различных источников, включая стационарные генераторы электромагнитных помех (ЭМП), которые способны нарушать работу электронных систем и коммуникаций. В условиях нарастающей зависимости от технологий, защита от таких угроз становится критически важной [1]. В связи с этим наблюдается рост исследований, направленных на разработку методов защиты от преднамеренного воздействия на процесс передачи данных и сами электронные устройства [2].

Одной из проблем таких исследований является необходимость экспериментального исследования на устойчивость таких систем. Для этого требуются генераторы высокой частоты, антенные облучатели и другое оборудование, которое часто является стационарным. Для исследования сетевого оборудования в реальных условиях необходим мобильный генератор преднамеренных помех [3]. Мобильные решения могут предоставить гибкость и эффективность для поиска объектов потенциальных атак и разработке методов защиты таких объектов. Такие устройства позволят организациям проводить учения и оценивать готовность своих систем к потенциальным атакам. В данной статье предложен способ реализации генератора электромагнитных помех на основе искрового промежутка.

Активные исследования в области электромагнитных угроз (ЭМП) направлены на понимание рисков для ключевой национальной инфраструктуры и киберфизических систем [4; 5]. Эти исследования включают анализ требований к генераторам и антеннам, а также изучение примеров атак и контрмер. Отдельные работы углубляются в специфические системы: изучается влияние ЭМП на беспилотники (их структуру, связь и кабельные цепи) [6], моделируются системы электропитания с учетом возмущений [7], разрабатываются импульсные генераторы помех (в диапазоне 20 МГц – 600 МГц) [8], и определяются пути проникновения помех через вторичные источники питания вычислительных систем с предложением методов оценки

их вклада [9]. Однако, несмотря на значительный объем работ, большинство разработанных решений ориентировано на стационарные генераторы, что ограничивает их применимость в динамичных условиях. Недостаток данных о мобильных генераторах ЭМП и их использовании в реальных сценариях создает препятствия для практического внедрения. В связи с этим, актуальной задачей становится разработка и экспериментальная проверка мобильных генераторов электромагнитных помех, предназначенных для моделирования атак в условиях реальной эксплуатации оборудования.

Материалы и методы

На рисунке 1 изображена блок-схема генератора преднамеренных ЭМП.



Рисунок 1 – Блок-схема генератора преднамеренных ЭМП

Принцип работы генератора основан на формировании импульсных всплесков напряжения за счет коммутации тока. Коммутация осуществляется на специальном разряднике путем создания высокого напряжения на искровом промежутке. Для создания высокого напряжения использован конвертер напряжения. Входное напряжение такого повышающего силового модуля составляет от 3 до 6 В, а выходное достигает до 400 кВ. Для обеспечения мобильности в качестве источника питания можно использовать аккумуляторную батарею с максимальным долговременным током разрядки от 5 до 10А.

На рисунке 2 изображена принципиальная схема генератора преднамеренных электромагнитных помех.

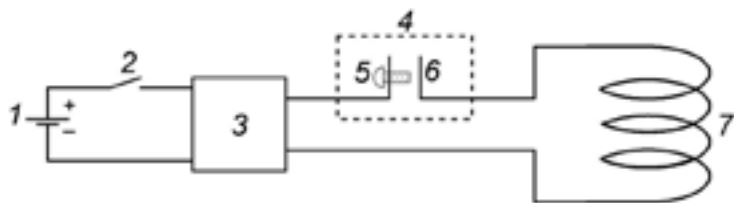


Рисунок 2 – Принципиальная схема генератора ЭМП

Устройство содержит источник питания 1, к выводам которого через пусковой кнопочный выключатель 2 подключены входные выводы высоковольтного импульсного повышающего DC-DC преобразователя 3

напряжения до 400кВ. К выходным выводам с высоковольтной стороны DC-DC преобразователя последовательно подключены разрядник 4 и индуктор 7. Разрядник представляет собой два электрода в виде токопроводящих металлических пластин. Одна из пластин имеет внутреннюю резьбу для токопроводящего болта 5. Вторая пластина представляет собой сплошной токопроводящий электрод 6. Пластины расположены друг напротив друга. При этом болт 5 ввинчивается в пластину так, чтобы между ним и пластиной напротив оставался искровой промежуток. Таким образом имеется возможность за счет вращения винта 5 регулировать ширину искрового промежутка. Как было указано выше разрядник соединен с индуктором. Индуктор представляет собой несколько витков провода.

При возникновении на разряднике достаточно высокого напряжения пробивается воздушный промежуток между токопроводящим болтом и электродом, расположенным напротив. В искровом промежутке возникает электрическая дуга и через индуктор начинает протекать электрический ток. Вследствие этого падает напряжение на выводах DC-DC преобразователя, и электрическая дуга гаснет, ток через индуктор угасает. Далее напряжение на выводах преобразователя восстанавливается и вновь процесс повторяется. При этом за счет изменения расстояния искрового промежутка от 0,1 до 25 мм регулируется частота тока. От ширины искрового промежутка также зависит и амплитуда импульсов. Согласно Закона Пашена амплитуда (V_p) этих импульсов зависит от произведения давления воздуха (p) на расстояние между электродами (a):

$$V_p = \frac{2737 \cdot p \cdot d}{\ln(112 \cdot p \cdot d) - \ln(\ln(1 + 1/\gamma))}$$

где γ – коэффициент вторичной эмиссии электронов с катода.

Настройка генератора требует учета зависимости напряжения пробоя от давления воздуха при фиксированном расстоянии между электродами. Повышение давления приводит к увеличению этого напряжения, что дает возможность управлять параметрами электрических колебаний в искровом промежутке и, соответственно, в индукторе. Индуктор, преобразуя ток в магнитное поле, позволяет создавать направленные электромагнитные помехи. Эти помехи используются для оценки устойчивости радиоэлектронной аппаратуры к внешним электромагнитным воздействиям. Сила создаваемого магнитного поля напрямую связана с количеством витков индуктора – чем их больше, тем мощнее поле. Тем не менее, следует избегать избыточного количества витков, так как это может привести к увеличению индуктивности

и снижению эффективности передачи энергии. Диаметр витков индуктора может быть как фиксированным, так и адаптированным под размеры исследуемого узла аппаратуры.

Результаты и обсуждение

Печатная плата генератора преднамеренных электромагнитных помех показана на рисунке 3.

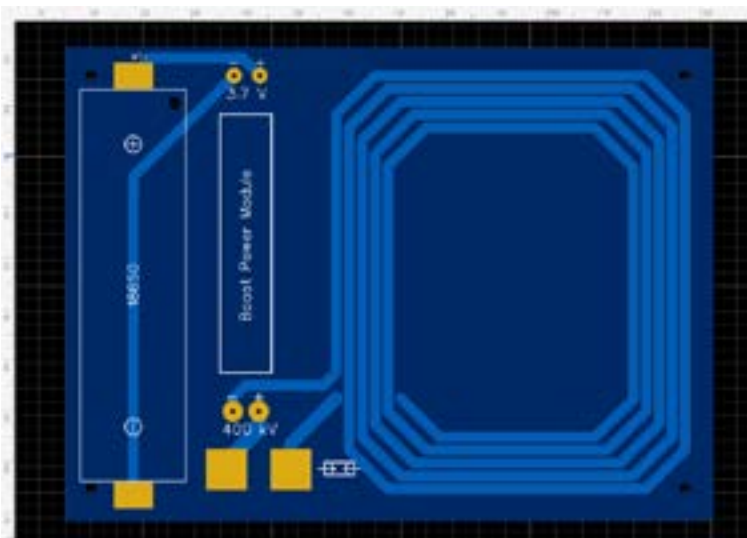


Рисунок 3 – Печатная плата генератора ЭМП

Печатная плата разработана в среде проектирования EasyEDA. Устройство достаточно компактное. Печатная плата имеет размеры 94×127 мм. Индуктор составляет 5 витков диаметром в среднем 60 мм и расположен непосредственно на плате.

На Рисунке 4 изображена фотография готового устройства генератора преднамеренных электромагнитных помех.



Рисунок 4 – Внешний вид генератора преднамеренных электромагнитных помех

В качестве источника питания использована аккумуляторная батарея Samsung ICR18650-26F с номинальной емкостью 2600 мАч и током непрерывного разряда до 5.2А.

Был проведен ряд экспериментальных исследований опытного образца генератора преднамеренных электромагнитных помех. Опытный образец генератора создавал электромагнитные импульсы с частотой до 2,5 ГГц и напряженностью электрического поля до 5 кВ/м.

Произведено исследование характеристики воздействия генерируемых электромагнитных помех на линию передачи данных в виде неэкранированной медной витой пары PVC 4x2x0.52 категории 5е. Схема экспериментальной установки показана на рисунке 5.



Рисунок 5 – Схема экспериментальной установки

Для анализа сигнала использован осциллограф с широкой полосой пропускания. Сигнал высокоскоростного стандарта 1000BASE-T передается от компьютера 1 к компьютеру 2, соединение производится по технологии Gigabit Ethernet при помощи неэкранированной медной витой пары PVC 4x2x0.52 категории 5e длиной 12 м и модульным разъемом 8P8C. В качестве компьютеров использовались ноутбуки и питание осуществлялось от аккумуляторных батарей, чтобы избежать паразитных наводок при питании от сети переменного тока.

Для упрощения исследования в рамках эксперимента в качестве данных непрерывно передавались ICMP Echo Reply пакеты при помощи утилиты ping, а на обратной стороне производилась фиксация доставленных эхо-запросов. В результате производился подсчет процента потерянных пакетов.

Передаваемые сигналы также фиксировались на осциллографе (Рисунок 6).

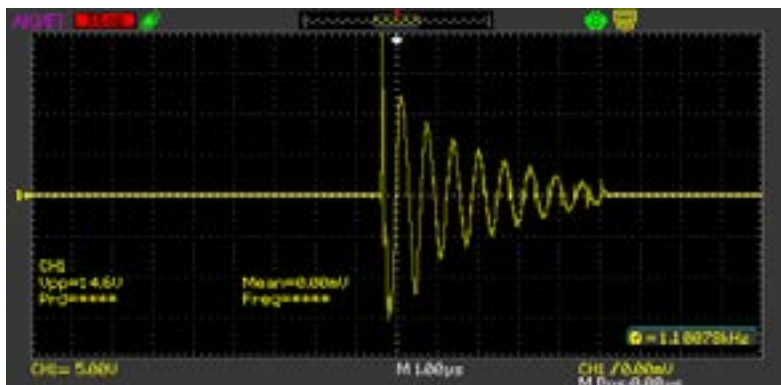


Рисунок 6 – Осциллограмма наведенной помехи в кабеле

Поскольку сигнал в Ethernet передается по паре проводов и является дифференциальным, то щупы осциллографа подключаются непосредственно к паре проводов у разъема. При этом для подключения сигнала на второй канал осциллографа использовались специальные дифференциальные щупы. Передаваемый сигнал регистрируется на осциллографе и сохраняется и далее переносится на компьютер для более детального анализа.

Как видно из осциллограммы преднамеренная помеха в виде электромагнитного импульса, наведенного на витую пару, представляет собой затухающий синусоидальный сигнал. Прежде всего колебательный процесс связан с LC-контуром, который состоит из индуктивности редутора и емкости разрядника. Изменяя данные параметры, можно корректировать частоту помехи в допустимых значениях.

Амплитуда такой помехи в кабеле может достигать до 25 В, что является достаточным не только для нарушения процесса передачи информации, но и для вывода из строя сетевого оборудования.

В частотном диапазоне спектр помехи находится в пределах от 0,5 МГц до 2,5 ГГц. Это также обусловлено наличием паразитных емкостей и индуктивностей, а также случайностью процесса разряда в искровом промежутке. Таким образом, можно классифицировать генерируемое электромагнитное воздействие. В [10] предложено классифицировать помехи на три категории в зависимости от охвата частот: с узкой полосой, средней полосой и сверхширокой полосой. Для определения полосы частот используем метод, описанный в [11]:

$$\text{относительная ширина полосы} = \frac{2(f_H - f_B)}{(f_H + f_B)},$$

где f_B, f_H – верхняя и нижняя частоты, либо

$$\text{процентная ширина полосы} = 200 \frac{(br-1)}{(br+1)},$$

где $br = \frac{f_H}{f_B}$ – это отношение полосы частот.

На основании расчета можно классифицировать электромагнитную помеху согласно таблице 1.

Таблица-1 – Классификация ЭМП

Тип полосы	процентная ширина полосы (pbw)	отношение полосы частот (br)
гипополоса или узкополосная	$\leq 1\%$	$\leq 1,01$
мезополоса	$1\% < p_{bw} \leq 100\%$	$1,01 < br \leq 3$
суб-гиперполоса	$100\% < p_{bw} \leq 163,4\%$	$3 < br \leq 10$
гиперполоса	$163,4\% < p_{bw} \leq 200\%$	$br > 10$

Таким образом, генерируемые электромагнитные помехи относятся к мезополосному диапазону, что позволяет отнести генератор ЭМП к узкополосным устройствам. Экспериментальное исследование включало также наблюдение за состоянием токопроводящих пластин разрядника. Экспериментальные данные свидетельствуют о незначительном влиянии разряда малой мощности на состояние пластин разрядника. Несмотря на это, для обеспечения оптимальных характеристик и надежности в практических приложениях, рекомендуется применение специализированных сплавов для электродов.

Информация о финансировании

Данное исследование финансировалось Комитетом науки Министерства науки и высшего образования Республики Казахстан (грант № BR28712227).

Выводы

В ходе экспериментальных исследований подтверждена функциональность разработанного устройства. Результаты показали стабильную генерацию импульсов и возможность прецизионной регулировки параметров электромагнитного излучения.

Для проведения испытаний применялся индуктор с пятью витками, имеющий диаметр в диапазоне 60–70 мм. Питание осуществлялось от аккумуляторной батареи типоразмера 18650, характеризующейся номинальным напряжением 3,75 В и максимальным током разрядки 5200 мА. В результате удалось добиться стабильной генерации электромагнитных импульсов с частотой до 2,5 ГГц и напряженностью электрического поля до 5 кВ/м.

Было установлено, что регулировка искрового промежутка (от 0,1 до 8 мм), вариации опорного напряжения и изменения в индукторе (количество и диаметр витков) позволяют изменять частоту и амплитуду электромагнитного излучения. Экспериментально доказана стабильность работы генератора по созданию электромагнитных импульсов в широком диапазоне их характеристик.

К основным достоинствам генератора относятся его компактные габариты, простота схемотехнической реализации и отсутствие потребности в источниках высокой частоты, антеннах-облучателях и рупорных излучателях.

Селективность воздействия, способствующая повышению достоверности испытаний отдельных радиоэлектронных узлов, обеспечивается путем варьирования геометрических параметров индуктора.

Предлагаемое устройство предназначено для генерации и инъекции электромагнитных импульсов с возможностью регулировки частоты в радиоэлектронную аппаратуру и её отдельные блоки. Это обеспечивает возможность оценки помехоустойчивости аппаратуры к воздействию преднамеренных электромагнитных помех.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1 Anarbayev, A., Moldakhmetov, S., Talipov, O., and Kazanbayeva, A., // «Research on the exposure of radio-electronic equipment to ultrashort electromagnetic pulses and microwave radiation» // ARPN Journal of Engineering and Applied Sciences, – 2023. – 18(11). – P. 1300–1308. – <http://doi.org/10.59018/0623168>

2 P. Rajchowski, K. K. Cwalina, J. Magiera, A. Olejniczak, P. T. Kosz, A. Czapiewska, R. Burczyk, K. Kowalewski, J. Sadowski, S. J. Ambroziak, «AEGIS – Mobile Device for Generating Electromagnetic Curtain for Special Applications and Countering the Threats of RCIED», // International Journal of Electronics and Telecommunications. – 2020. – Vol. 66. – No 1. – P. 187–192. – <http://dx.doi.org/10.24425/ijet.2020.131862>

3 W. A. Radasky, C. E. Baum and M. W. Wik, «Introduction to the special issue on high-power electromagnetics (HPEM) and intentional electromagnetic interference (IEMI),» in IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility, Vol. 46. – No. 3. – P. 314–321. – Aug. 2004. <http://doi.org/10.1109/TEMC.2004.831899>

4 See K.Y., «Practical Papers, Articles and Application Notes», // IEEE Electromagnetic Compatibility Magazine, 13. – P. 44–44. <http://doi.org/10.1109/MEMC.2024.10834436>.

5 J. Dawson, «Intentional Electromagnetic Interference Effects in Cyber-Physical Systems» // Proceedings of EMCUK 2015, October 6–7 2015. – <http://doi.org/10.13140/RG.2.1.5166.6643>

6 S. Ibeobi, and X. Pan, Study of electromagnetic pulse (EMP) effect on surveillance unmanned aerial vehicles (UAVs)» // Journal of Mechanical Engineering, Automation and Control Systems. – 2(1). – P. 44–53. – <http://doi.org/10.21595/jmeacs.2021.21926>

7 K. Jakubiuk, D. Kowalak, and M. Nowak, «The forming and emission of high power electromagnetic pulses» ITM Web of Conferences. –19, – 01001. – <http://doi.org/10.1051/itmconf/20181901001>

8 R. Verma et al., Impulse electromagnetic interference generator, Conference Record of the Twenty-Sixth International Power Modulator Symposium, – 2004

High-Voltage Workshop., San Francisco. – 2004. – P. 543–546. – <http://doi.org/10.1109/MODSYM.2004.1433634>

9 M. Shkinderov and Z. Gizatullin, «Technique for Noise Immunity Analysis of Access Control Systems Using Electromagnetic Topology Method.» 2020 International Russian Automation Conference (RusAutoCon). – 2020. – P. 144–148. – <http://doi.org/10.1109/RusAutoCon49822.2020.9208154>

10 L. Babich and T. V. Loiko, Generalized Paschens Law for Overvoltage Conditions in IEEE Transactions on Plasma Science. – Vol. 44. – No. 12. – P. 3243–3248. – <http://doi.org/10.1109/TPS.2016.2629022>

11 D. V. Giri and F. M. Tesche, «Classification of intentional electromagnetic environments (IEME)» // IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility, Vol. 46. – No. 3. – P. 322–328. – Aug. – 2004. – <http://doi.org/10.1109/TEMC.2004.831819>.

Поступило в редакцию 03.10.25.

Поступило с исправлениями 10.11.25.

Принято в печать 05.12.25.

С. С. Молдахметов¹, *А. Е. Анарбаев², А. П. Кислов³,

Б. Т. Абдрахманов⁴, А. С. Аябаев⁵

¹М. Қозыбаев атындағы Солтүстік Қазақстан университеті,

Қазақстан Республикасы, Петропавл қ.;

^{2,3,4,5}Торайғыров университеті, Қазақстан Республикасы, Павлодар қ.

03.10.25 ж. баспаға түсті.

10.11.25 ж. түзетулерімен түсті.

05.12.25 ж. басып шығаруға қабылданды.

ҰШҚЫН РАЗРЯДТАҒЫШЫНА НЕГІЗДЕЛГЕН ҚАСАҚАНА ЭЛЕКТРОМАГНИТТІК КЕДЕРГІЛЕРДІҢ ГЕНЕРАТОРЫ

Мақала әдейі электромагниттік кедергілерді тудыратын мобильді құрылғыны әзірлеуге арналған. Жұмыс принципі реттелетін электромагниттік импульстарды жасауға мүмкіндік беретін ұшқын разрядтағышқа және индуктивті элементке негізделген. Жұмыс жиілігінің диапазоны 2,5 ГГц-ке жетеді, ал электр өрісінің кернеулігі 5 кВ/м дейін болуы мүмкін. Генератор жоғары вольтты импульсті DC-DC түрлендіргішімен жабдықталған және портативті батареямен жұмыс істейді.

Эксперименталды түрде пайда болған кедергілер 5е санатындағы экрандалмаған бұралған жұпты қолдана отырып жасалған деректер желілерінің жұмысына айтарлықтай әсер етуі мүмкін екендігі анықталды. жүргізілген осциллограмма талдауы көрсеткендей, индукцияланған кедергі сөнетін синусоидальды сигнал түрінде болады, оның параметрлері ұшқын аралығының Шири және индуктордың конфигурациясын реттеу арқылы өзгеруі мүмкін. Ұшқын аралығын реттеу сәулелену жиілігі мен амплитудасын өзгертуге мүмкіндік береді. Шығарылатын кедергілер спектрінің жіктелуі құрылғының генераторлардың орта жолақты түріне жатқызуға мүмкіндік береді.

Шағын габариттері мен дербестігімен ерекшеленетін ұсынылған генератор электромагниттік тұрақтылыққа радиоэлектрондық аппаратураның мобильді сынақтарын жүргізуге арналған. Мұндай мобильді шешімдер нақты деректерді қамтамасыз ете отырып, нақты жұмыс жағдайында желілік жүйелердің қауіпсіздігін жақсарту үшін өте маңызды.

Кілтті сөздер: электромагниттік кедергі, ұшқын сөндіргіші, 5е санатындағы бұралған жұп, индуктор, әдейі кедергі.

S. S. Moldakhmetov¹, *A. Ye. Anarbayev², A. P. Kislov³,

B. T. Abdrakhmanov⁴, A. S. Ayabayev⁵

¹M. Kozybayev North Kazakhstan University,

Republic of Kazakhstan, Petropavlovsk;

^{2,3,4,5}Toraighyrov University, Republic of Kazakhstan, Pavlodar.

Received 03.10.25.

Received in revised form 10.11.25.

Accepted for publication 05.12.25.

INTENTIONAL ELECTROMAGNETIC INTERFERENCE GENERATOR BASED ON SPARK ARRESTOR

The article is devoted to the development of a mobile device for generating intentional electromagnetic interference. The principle of operation is based on a spark arrester and an inductive element, which allows you to create adjustable electromagnetic pulses. The operating frequency range reaches 2.5 GHz, and the electric field strength can be up to 5 kV/m. The generator is equipped with a high-voltage DC-DC pulse converter and is powered by a portable battery.

It has been experimentally established that the generated interference can have a significant impact on the functioning of data transmission lines made using unshielded twisted pair of category 5e. The analysis of the waveforms showed that the induced interference has the form of a decaying sinusoidal signal, the parameters of which can be changed by adjusting the width of the spark gap and the configuration of the inductor. Adjusting the spark gap allows you to change the frequency and amplitude of the radiation. The classification of the spectrum of emitted interference made it possible to classify the device as a medium-band type of generators.

The presented generator, characterized by small dimensions and autonomy, is designed for conducting mobile tests of radio-electronic equipment for electromagnetic stability. Such mobile solutions are critically important for improving the security of network systems in real-world operation by providing accurate data.

Keywords: electromagnetic interference, spark arrester, category 5e twisted pair, inductor, intentional interference.

FTAMP 44.01.01

<https://doi.org/10.48081/SSGE6270>***Д. Т. Мұзапаров¹, О. М. Талипов²**^{1,2}Торайғыров университет, Қазақстан Республикасы, Павлодар қ.¹ORCID: <https://orcid.org/0009-0009-0733-2343>²ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-8355-1769>*e-mail: mdt07@bk.ru

МОДИФИКАЦИЯЛАНҒАН БЕТТЕРДЕ ҚАЙНАҒАН КЕЗДЕ ЖЫЛУ АЛМАСУДЫ КҮШЕЙТУДІҢ ЗАМАНАУИ ӘДІСТЕРІ

Модификацияланған құрылымы және берілген ылғалдылығы бар жылу алмасу беттерінде қайнаған кезде жылу алмасуды пассивті интенсификациялаудың заманауи әдістеріне шолу берілген. Энергетика, микроэлектроника және аэроғарыш салаларының қазіргі даму тенденциялары жылу өндірудің үздіксіз өсуімен сипатталады, бұл жылу тиелген жабдықтар үшін жоғары тиімді салқындату жүйелерін құруды талап етеді. Қолданыстағы салқындату жүйелерінің ішінде салқындатқыштың қайнауына негізделген жүйелер ең кең таралған болып қала береді, бірақ жоғары тығыздықтағы жылу ағындарын бұру үшін жылу беру коэффициентін (ЖБК) және критикалық жылу ағынын (КЖА) едәуір арттыруға мүмкіндік беретін шешімдер қажет. Ең перспективалы-жылу алмасу беттерінің беткі қасиеттері мен морфологиясының өзгеруіне негізделген пассивті интенсификациялық тәсілдері. Мақалада осы саладағы ең жаңа жетістіктер, соның ішінде беттердің лазерлік, химиялық және физикалық модификациясы, сондай-ақ әртүрлі ылғалдылық үлгілерін жасау (гидрофильді-гидрофобты құрылымдар) жүйеленген. Соңғы жылдардағы басылымдарды талдау негізінде магнетронды бұрқу, электрохимиялық анодты ою, нанокұрылым мен текстураның әртүрлі әдістері сияқты функционалды жабындарды қолдану технологиялары қарастырылды. Ылғалдылықтың (гидрофильділік және гидрофобтылық) бу көпіршіктерінің нуклеация процесстеріне, қайнау режимдерінің динамикасына түбегейлі әсеріне ерекше назар аударылады. ЖБК, КЖА бойынша өңдеудің әртүрлі әдістерінің тиімділігі және ұзақ пайдалану режимінде термиялық деградация

төзімділігі талқыланды. Синергетикалық әсерді көрсететін микроарналық құрылымдармен және наноқабаттармен беттік модификацияны біріктіретін біріктірілген гибриді тәсілдер бөлек қарастырылады. Қорытындылай келе, одан әрі зерттеу бағыттары тұжырымдалды, олардың арасында күрделі гибриді құрылымдардың КЖА есептеу үшін болжамды модельдер әзірлеу, экстремалды жылу жағдайында функционалды жабындардың ұзақ мерзімді тұрақтылығы мен механикалық беріктігін арттыру, сондай-ақ қарастырылған технологияларды масштабтау және нақты өнеркәсіптік жылу техникасына енгізу мәселелері бар.

Кілтті сөздер: қайнау, жылу беру коэффициенті, критикалық жылу ағыны, беттік модификация, сулану, наноқұрылымдар, микроарналар, бифильді беттер.

Кіріспе

Соңғы жылдары технологияның дамуымен жабдықтың өнімділігі едәуір өсті, бұл осы қондырғылар жұмыс істейтін жұмыс температурасының өсуіне әкелді. Бұл сын-қатерлер терморегуляцияға байланысты мәселелерді шешу үшін, атап айтқанда, оның сенімді және үздіксіз жұмысын қамтамасыз етуге бағытталған құрылғыларды салқындату үшін әлемдік ғылыми қоғамдастық тарапынан назар аударады. Бұл мәселені шешудің ең қол жетімді нұсқасы – жылу өткізгіштігі жоғары материалдарды пайдалану. Алайда, бұл әдіс тек материалдармен шектеледі. Бұл мәселені шешудің ең қарапайым әдістерінің бірі-жылу алмасу аймағын ұлғайту. Жылуды бөлудің балама әдісі қайнау процестері болуы мүмкін.

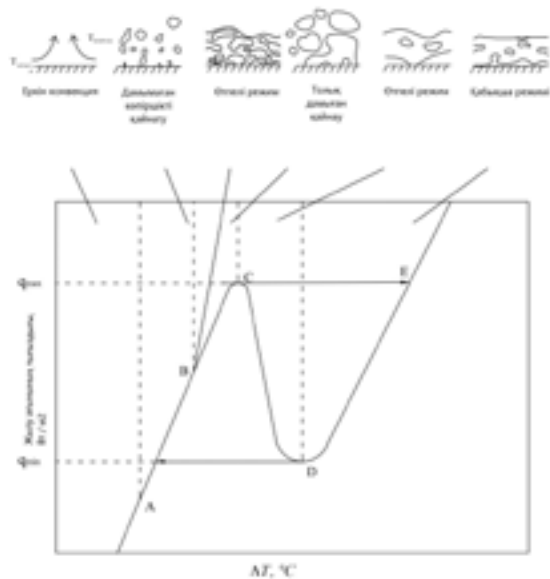
Бүгінгі таңда қайнау кезінде пайда болатын жылу беру процесі қатты дененің бетінен көп мөлшерде жылуды кетірудің ең тиімді әдістерінің бірі болып табылады. Қайнау процестері кейде 1000 Вт/см^2 дейін жететін жоғары тығыздықтағы жылу ағындарын бөлуді қажет ететін бірқатар инженерлік және өндірістік салаларда қолданылады. Мысалы: ядролық реакторларда қайнату оларды салқындату үшін қолданылады; микроэлектроникада қайнау электронды аппаратураның элементтерін салқындату үшін қолданылады, мұнда су компоненттерге еніп, жылуды сіңіреді және қайнай бастайды, ол компоненттердің бетінен жылуды алып тастайтын буға айналады, бұл электронды құрылғылардың салқындауына және қауіпсіз температура шегінде жұмыс істеуіне мүмкіндік береді; тоңазытқыш қондырғыларында қайнау процесі тоңазытқыш машиналарында жұмыс істейтін буландырғыштарда қолданылады; химия өнеркәсібінде қайнау қоспаны ерітіндіден бөліп алу үшін, сондай-ақ химиялық реакциялар жүргізу және химиялық өнімдердің кең спектрін өндіру үшін қажет заттарды газ тәрізді күйге келтіру үшін

қолданылады; ғарыштық технологияларда қайнау авиациялық және зымырандық-ғарыштық техникада қозғалтқыш жүйесінің өзін де, ұшатын қондырғылардың жеке тораптары мен конструкцияларын да салқындату үшін қолданылады аппараттар. Сондықтан қайнау процесі энергетика, микроэлектроника, тоңазытқыш техникасы, атом және химия өнеркәсібі, ғарыш технологияларында кеңінен қолданылатын жылу алмасудың ең тиімді әдістерінің бірі болып табылады.

Материалдар мен әдістері

Дәстүрлі тегіс қыздыру беттерінің жылу беру коэффициентін (ЖБК) және критикалық жылу ағынын (КЖА) арттыру мүмкіндігі шектеулі. Басқаша айтқанда, жылу алмасудың тиімділігі табиғи конвекция кезінде жылу берудің төмен коэффициентімен, сондай-ақ жылу алмасу дағдарысының басталуымен шектеледі, бұл беттің қызып кетуіне, содан кейін оның бұзылуына әкеледі, бұл бүкіл жылу алмасу жүйесінің сенімділігіне әсер етеді. Сондықтан жылу тасымалдағыштардың қайнауын қарқындату жылу беру коэффициенттерін (ЖБК) және критикалық жылу ағынын (КЖА) арттыруға, жылу алмасу дағдарысын жоғары температура аймағына ауыстыруға бағытталған негізгі міндет болып табылады, бұл болашақта жылу алмасу жүйелерінің пайдалану сипаттамаларын кеңейтуге, олардың өнімділігі мен сенімділігін арттыруға мүмкіндік береді.

Қатты бет қабырғасынан сұйықтыққа жылу беру режимдері 1-суретте көрсетілген. Бұл суретте бет пен сұйықтық арасындағы жылу берудің ең тиімді аймағы белсенді көпіршікті қайнау аймағы болып табылады, онда бу көпіршіктерінің пайда болуы, олардың өсуі және қыздыру бетінде бөлінуі пайда болады, бұл кейіннен беттің салқындауына әкеледі. Көпіршікті қайнау аймағынан тыс, критикалық жылу ағыны (КЖА) жылу беру коэффициентінің төмендеуіне айтарлықтай әсер етеді, бұл беткі температураның күрт өсуіне әкеледі. Қайнау пленканың қайнау фазасына өткеннен кейін жылу беру тиімділігі айтарлықтай төмендейді, бұл жабдықтың зақымдану қаупін тудырады. Сондықтан, ондаған жылдар бойы жүргізілген ғылыми зерттеулерден кейін ғалымдар әлі де қайнату тиімділігін арттырудың тиімді әдістерін іздеуде, бұл пленка қайнатуға көшуді мүмкіндігінше кешіктіруге үміттенеді [1].



1-сурет – Қайнау кисығы

Осылайша, көпіршікті қайнатудың пайда болу құбылысы және критикалық жылу ағыны (КЖА) жылу мен экономикалық тиімділікке, сондай-ақ тұтастай алғанда жылу алмасу жүйесінің қауіпсіздігіне айтарлықтай әсер ететін қайнау кезіндегі жылу алмасу процесінде шешуші болып табылады. Бүгінгі таңда осы сипаттамаларды жақсарту бойынша бірқатар эксперименттер мен зерттеулер жүргізілді. Соңғы онжылдықтарда қыздыру бетінде өлшемдері жүздеген нанометрден бірнеше микрометрге дейінгі микро және нанокұрылымдарды құру арқылы көпіршікті қайнау мен критикалық жылу ағынын (КЖА) жақсартуға ықпал ететін модификацияланған беттерді өндіру технологияларының қарқынды өсуі байқалды.

Сондықтан қайнауың қарқындылығы жылу беру коэффициенттерін арттыруға (ЖБК), жылу алмасу дағдарысын жоғары температура мен жылу ағындары аймағына ауыстыруға және көпіршікті қайнатуды тұрақтандыруға бағытталған.

Жылу беру процесін қарқындатудың перспективалық бағыттарының бірі-беттердің құрылымын, гидрофильділігін және микрогеометриясын басқаруға мүмкіндік беретін жылу алмасу беттерін өзгерту. Қайнау

процестерін қарқындету өнеркәсіптік процестердің энергия тиімділігін арттыру контекстінде маңызды міндет болып табылады.

Қайнау процестерін күшейтудің әртүрлі әдістері бар:

- механикалық бетті өңдеу технологиясы (кесу, жылтырату, тегістеу, соғу, штамптау, престоу, илемдеу, фрезерлеу);
- лазерлік бетті өңдеу технологиясы;
- бетке жабын жағу техникасы (арнайы материалдардың біртекті немесе гетерогенді жабыны);
- химиялық процестер (тотығу, химиялық ойып өңдеу);
- микро және нано электромеханикалық жүйелердің технологиясы (фотолитография техникасы, реактивті ионды ойып өңдеу және микро және нано беттерді жасау үшін терең реактивті ионды ойып өңдеу);
- жылу өткізгіштігін арттыру үшін салқындатқышқа нанобөлшектерді енгізе отырып, нано сұйықтықтарды қолдану техникасы.

Бүгінгі күні кесу, илемдеу және фрезерлеу сияқты механикалық (контактілі) өңдеу әдістерімен жасалған жылу алмасу беттерінің құрылымының қайнау қарқындылығына әсері егжей-тегжейлі зерттелген. Механикалық өңдеу әдістерімен текстураны өзгерту арқылы қайнауы интенсификацияланудың бұл тәсілінің негізгі идеясы белгілі бір рельефті қалыптастыру арқылы жылу беру бетінің ауданын ұлғайту болып табылады. Механикалық әдістермен текстураны қалыптастыру арқылы қайнауы күшейту бойынша зерттеулердің қолда бар деректеріне сәйкес, ең жоғары әсерлердің бірі деформациялық кесу өңдеу әдісін қолдану арқылы алынды [2]. Осы әдіс аясында металл беттерде биіктігі 340–570 мкм және 120–180 мкм кадаммен үш өлшемді микро қабырғалар жасалды. Мұндай құрылым жылу беру коэффициентін (ЖБК) 4-6 есе, ал критикалық жылу ағынын (КЖА) шамамен алты есе арттыруға мүмкіндік берді [2]. Қайнау кезінде жылу алмасу қарқындылығын арттыру үшін беттерді өңдеудің механикалық әдістеріне өте егжей-тегжейлі және заманауи шолу Володин О.А. [3].

Жылу алмасу беттерін контактсіз өңдеу бойынша қолда бар зерттеу нәтижелері жер бетіне жақын қабаттың өзгерген қасиеттері қайнау параметрлеріне қалай әсер ететінін сенімді болжау үшін әлі жеткіліксіз. Байланыссыз әдістердің ішінде металдарды лазерлік өңдеу ең перспективалы болып саналады [4]. Лазерлік сәулеленудің әсері жаңа қосылыстар түзу үшін беттің элементтік құрамын ғана емес, сонымен қатар нано түзу арқылы оның құрылымын, содан кейін агрегация мен микроэлементтерді өзгертуге мүмкіндік береді. Құрамы мен құрылымының елеулі модификациясы қажетті жер бетіне жақын қасиеттерді мақсатты түрде орнатуға және сол арқылы жылу тасымалдағыштардың қайнау процестерін қоса алғанда, технологиялық беттердегі физика-химиялық процестерді басқаруға мүмкіндік береді.

Нано, пико және фемтосекундтық ұзындықтағы сәулеленуді өңдеу әртүрлі нәтижелерге әкелетінін ескеру маңызды. Пико және фемтосекундтық әсер ету кезінде, өте жоғары қуатқа байланысты, термиялық әсер ету аймағы сәулелік дақпен шектеледі, яғни лазерлік дақ аймағынан тыс, наносекундтық өңдеуден айырмашылығы, беткі қабаттың айқын модификациясы болмайды. Наносекундтық әсер ету кезінде элементтік құрам мен текстураның өзгеруі айтарлықтай үлкен аймақтарды қамтиды. Дегенмен, барлық көрсетілген режимдер (нано, пико және фемтосекунд) металдардың беткі қабатының қасиеттерін түбегейлі өзгертуге мүмкіндік береді.

[5; 6] жұмыстарына сәйкес, мыс, болат және алюминийден жасалған жылу алмасу беттерінің лазерлік модификациясы дистилденген су немесе FC-72 (құрамында фтор бар салқындатқыш сұйықтық) сияқты салқындатқыштар қайнаған кезде критикалық жылу ағынының (КЖА) және жылу беру коэффициентінің (ЖБК) жоғарылауына әкеледі. Алайда, [7] атап өткендей, лазермен текстураланған беттер жылу алмасу параметрлерін жақсартады (нуклеация орталықтарының санының өсуі және жылу беру коэффициентінің жоғарылауы арқылы (ЖБК)), ойып өңдеу әдісімен алынған кавернасы бар беттер одан да жоғары көрсеткіштерді көрсетеді. Сонымен қатар, [8] микрокуаттары жоқ салыстырмалы түрде таяз микротекстуралы беттер тегіс (жылтыратылған) беттермен салыстырылатын қайнау сипаттамаларын көрсететіні анықталды.

Жылу алмасу беттерін өңдеудің жанасу және жанаспайтын әдістерінен басқа, беткі қабаттың қасиеттерін айтарлықтай өзгерту, демек, әр түрлі жабындарды қолдануға негізделген тәсіл қайнау кезінде жылу беруді басқаруға мүмкіндік береді. Шартты түрде жабындарды қалыптастыру әдістерін екі топқа бөлуге болады: физикалық (магнетронды бүрку, центрифугалау, бүрку) және химиялық (газ фазалы химиялық тұндыру, электрохимиялық ойып өңдеу). Жабындар материалда да, құрылымда да әр түрлі болуы мүмкін: оксид қабатын қалыптастырудан [9] нанотүтікшелер, нано талшықтар [10] немесе металл бөлшектерін жағуға дейін [11]. Жабындарды жағудың физикалық және химиялық әдістері жылу алмасу беттерінің беткі қабатының қасиеттері мен сипаттамаларын айтарлықтай өзгертуге мүмкіндік береді, бұл жылу беру коэффициентін (ЖБК), критикалық жылу ағынын (КЖА) арттыру және бу түзу орталықтарының санын көбейту арқылы қайнауың қарқындылығына әкеледі. Алайда, мұндай жабындардың беріктігі және оларды практикалық қолдану үшін масштабтау мәселелері ашық болып қалады және жан-жақты, кең ауқымды зерттеулерді қажет етеді. Жабындарды қалыптастырудың ең перспективалы әдістерінің бірі жоғары энергиялы плазмалық бүрку [12] екенін атап өткен жөн. Бұл әдіс үлгінің бетінде берік, жоғары адгезиялы және біркелкі жабын алуға мүмкіндік

береді. Плазмодинамикалық синтез процесінде 1 км/с астам жылдамдықпен импульстік эрозиялық плазманың жоғары жылдамдықты әсер ету шарттары іске асырылады. Мұндай әсер жабын материалының ол қолданылатын негізге гидродинамикалық араласуын тудырады. Осының арқасында жабын жылу алмасу беттерін өңдеудің байланыссыз әдістері үшін қол жетімді емес адгезияны едәуір арттырады. Мыс бетіне алюминий жабынын плазмалық бүрку арқылы жағу жылу беру коэффициентін (ЖБК) 68 %-ға арттырып, критикалық жылу ағынын (КЖА) жылтыратылған мыспен салыстырғанда 2,39 есе арттыратыны белгілі [12].

Жоғарыда аталған барлық нұсқалардың ішінде беттің модификациясы химиялық және механикалық тұрақтылықты жеңудегі салыстырмалы түрде аз қиындықтардың арқасында айтарлықтай назар аударды.

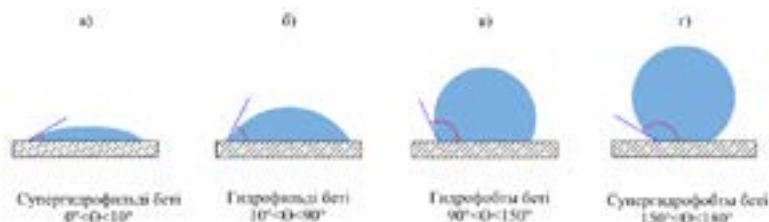
Жылу алмасу бетінің геометриясынан басқа, қайнау процесін күшейтуде қатты дененің сулануы да маңызды рөл атқарады. Беттің сулануы тамшының қандай күйде екенін анықтайды (Вензель немесе Касси-Бакстер күйі, 2-сурет) және оның ішіндегі бу көпіршігінің пайда болуы мен өсуіне, сондай-ақ тамшы көлеміндегі конвективті ағындардың сипатына әсер етеді. Сондықтан сұйықтықтың бір тамшысының қыздырылған бетімен өзара әрекеттесуін зерттеу жылу алмасу жүйелеріндегі жылу беру механизмдері мен сипаттамаларын түсінудің кілті болып табылады. Қыздырылған бетке тиетін бір тамшының мінез-құлқын талдау жылу массасының негізгі заңдылықтарын анықтауға мүмкіндік береді. Алайда, тіпті бір тамшының қайнауы да көптеген факторларға әсер ететін күрделі процесс: сұйықтықтың өзі, қоршаған орта жағдайлары, бетінің температурасы және оның ерекшеліктері. Сондықтан көптеген ғылыми зерттеулерде ылғалдылық қыздырылған беттерде қайнаған кезде жылу алмасу нәтижелеріне әсер ететін негізгі факторлардың бірі ретінде қарастырылады [13].



2-сурет – Вензель мен Касси-Бакстердің жағдайы

Супергидрофобты және супергидрофильді беттер жылу беруді күшейту үшін заманауи технологияларда кеңінен қолданылады (3-сурет). Беттің кедір-бұдырлығы мен сулануы қайнау процесінің екі негізгі параметріне әсер етеді: жылу беру коэффициенті (ЖБК) және критикалық жылу ағыны (КЖА). Жылу

ағыны критикалық мәннен асып кетсе, Сұйықтық пен бет арасындағы бу қабатының пайда болуына байланысты беткі температура күрт көтеріледі, бұл жабдықтың апаттық режимін тудыруы мүмкін. Критикалық жылу ағынының (КЖА) жоғарылауы қайнау процесерінде жоғары температураға қауіпсіз жетуге мүмкіндік береді. Сондай-ақ, тамшы ішіндегі конвективті ағындардың табиғаты гидрофильді және гидрофобты беттерде айтарлықтай ерекшеленетіні белгілі.



3-сурет – супергидрофильді (а), гидрофильді (б), гидрофобты (в) және супергидрофобты (г) беттеріндегі сулану контакт бұрышы

Беттік модификация-тамшылатып және жұқа қабықшалы қайнату кезінде жылу беруді жақсартудың ең көп таралған әдістерінің бірі. Беткі құрылымның өзгеруі және оның сулануы жылу берудің қарқындылығына, сондай-ақ көпіршікті қайнатудың пайда болуына, қалыптасуына, өсуіне, бөлінуіне және бу көпіршіктерінің кейіннен бірігуіне айтарлықтай әсер етеді. Ылғалдылық, өз кезегінде, бетінің кедір-бұдырлығымен және химиялық құрамымен анықталады. Қыздырылған беттердің гидрофильді және гидрофобты қасиеттері салқындатқыштың қайнау сипаттамаларына әр түрлі әсер етеді.

Гидрофобты беттерде көпіршікті қайнату процесі ертерек басталады, өйткені мұнда нуклеация орталықтарының саны көп. Нәтижесінде, төмен жылу ағындарында гидрофобты беттерде жылу беру коэффициенті (ЖБК) гидрофильді беттерге қарағанда жоғары. Алайда, жылу ағынының өсуімен бу көпіршіктерінің мөлшері мен саны артады, бұл бу пленкасының пайда болуына және жылу беру коэффициентінің төмендеуіне әкеледі (ЖБК). Сондықтан, гидрофильді беттерде қайнаудың кейінірек басталуына қарамастан, жоғары жылу ағындарында олар жақсы ылғалданудың арқасында тиімді жылу беруді қамтамасыз етеді. Тиісінше, гидрофильді беттерге арналған критикалық жылу ағыны (КЖА) жоғары.

Осылайша, гидрофобты беттер кіші жылу ағындарында, ал гидрофильді беттер үлкен жылу ағындарында қолайлы.

Сондай-ақ, жылу беру коэффициентінің (ЖБК) және критикалық жылу ағынының (КЖА) өсуіне учаскелерді әртүрлі ылғалдылықпен біріктіретін бифильді беттер арқылы қол жеткізуге болады, бұл сұйық фазаның жанасу аймағының азаюымен нуклеация орталықтарының жоғары тығыздығын қамтамасыз етеді [14]. Мұндай беттер жоғары тиімділікті көрсетті. Гидрофильді және гидрофобты аймақтардың тіркесімі тамшының булану процесін өзгертеді. Атап айтқанда, бифильді құрылымдар гидрофобты учаскелерде ерте көпіршікті қайнатуды бастауға мүмкіндік береді, сонымен бірге гидрофильді жерлерде Жоғары критикалық жылу ағынын (КЖА) қамтамасыз етеді, бұл оларды қайнау кезінде жылу беруді жақсарту үшін әсіресе перспективалы етеді [15].

Бифильді жылу өткізгіш беттер әртүрлі әдістермен жасалды, соның ішінде гидрофильді бетте литография арқылы гидрофобты аймақтарды қалыптастыру [16], содан кейін гидрофобты агентті бүрку арқылы маскировка [17], сондай-ақ булану-кристалдану әдісі [18].

Соңғы жылдары лазерлік материалдарды өңдеу технологиялары салыстырмалы түрде төмен қаржылық шығындардың, іске асырудың қарапайымдылығының, жоғары өнімділіктің және беттің функционалдық қасиеттерін мақсатты түрде өзгерту мүмкіндігінің арқасында көбірек назар аударуда. Сонымен қатар, лазерлік өңдеу бифильді құрылымдарды жасауға мүмкіндік береді. Жұмыста [15] алюминий нитридінде бифильді беттерді алу үшін гидрофильді және супергидрофобты аймақтарды құрайтын лазерлік өңдеу мен силанизацияның комбинациясы қолданылды. [15] Лаплас қысымының айырмашылығы көпіршіктердің супергидрофобты аймаққа қарай жылжуына әкелетіні анықталды.

Зерттеуде [19] лазерлік абляцияны және одан кейінгі силанизацияны қолдана отырып, кремний субстратында бифильді беттер пайда болды. 16,4 Вт/см² жылу ағынында ұсақ бу көпіршіктері тек супергидрофильді аймақта пайда болатындығы көрсетілген. Сондай-ақ, супергидрофобты аймақтың температурасы супергидрофильді аймақтың температурасынан 25 °С жоғары, ал кіші жылу ағындарында 90 °С жоғары екендігі анықталды.

2 мм қадамы бар 2×2 мм шаршы өрнектер түріндегі бифильді құрылымдар мыс түтікте химиялық Тұндыру және пикосекундтық лазер арқылы жасалған [14]. Мұндай беттің жылу беру коэффициенті (ЖБК) жылтыратылған мыспен салыстырғанда 1,16 есе өсті, бірақ жоғары жылу ағындары бар супергидрофобты аймақтар үшін коэффициенттің 0,83-ке дейін төмендеуі байқалды, бұл ылғалдылыққа байланысты көпіршік динамикасындағы айырмашылықтарға байланысты [14].

Супергидрофилді алюминий беттері химиялық тұндыру мен наносекундтық лазерлік Текстураның қосындысы арқылы алынды [20].

Оңтайлы жылу алмасу тиімділігі (КЖА және ЖБК өсуі) гидрофобты нүктелік учаскелер арасындағы қашықтық көпіршіктің бөліну диаметріне сәйкес келген кезде қол жеткізіледі [20].

Жұмыста [8] тот баспайтын болат фольгаға ПДМС-кремний диоксиді (полидиметилсилоксан) гидрофобты жабыны жағылды, ал супергидрофильді аймақтарды қалыптастыру үшін жергілікті лазерлік термиялық өңдеу қолданылды. Алынған бифильді бет көпіршікті қайнауың басталу температурасын және жылтыратылған, гидрофобты және гидрофильді беттермен салыстырғанда жоғары жылу беру коэффициентін (ЖБК) қамтамасыз етті [8].

Біз 2025 жылдың қыркүйегінде Томск ғылыми-зерттеу политехникалық университетінің базасында Турбомаркер түріндегі лазермен өңделген алюминий қорытпасынан жасалған дайындалған үлгілерге бірнеше эксперименттер жүргіздік (Ресей Федерациясы шығарған). Беттер екі-алты сағат бойы өңделді, супергидрофильді ұшы бар қырлы беттер алынды. Лазермен өңдеуден бұрын қалыңдығы 3 мм пластиналар алмаз пастасымен айна жылтырына дейін жылтыратылды, ұштары будың пайда болуының қажетті орталықтарын болдырмау үшін біркелкі ісключстікті болдырмау үшін металл файлмен өңделді. Содан кейін, лазерлік қондырғыда үлгінің температурасын бекіту үшін термопара үшін үш таяз тесік бұрғыланды. Әрі қарай, текстура қолданылды, үлгі экспериментті таза ұстау үшін ультрадыбыстық ваннадағы ықтимал ластаушы заттардың қалдықтарынан тазартылды. Төменгі және бүйір бөліктері көпіршікті нуклеация орталықтарын болдырмау үшін ыстыққа төзімді тығыздағышпен жабылған, өйткені зерттеуге тек текстуралы бет қатысады. Үлгілердің бірі 4-суретте көрсетілген.



4-сурет – Эксперимент үшін дайындалған үлгі

Эксперимент кезінде реостаттағы ток күші мен кернеу мөлшерін реттеу арқылы сынақ үлгісінде жылу жүктемесі біртіндеп өсті. Тәжірибе 100 градус Цельсий температурасында қайнаған, деаэrlenген суда жүргізілді. Контейнердегі судың температурасы екі электр қайнатқышымен қамтамасыз етілді.

Нәтижелер және талқылау

Қайнау процесіне бағытталған көптеген зерттеулерге қарамастан, бұл құбылыстың бірыңғай қабылданған теориясы әлі жоқ. Бұл әртүрлі кеңістіктік масштабта қайнатуға әсер ететін көптеген факторларға байланысты. Олардың ішінде оның кедір-бұдырлығы мен сулануымен анықталатын бетінің күйі шешуші рөл атқарады.

Лазерлік модификацияға негізделген металды өңдеудің байланыссыз әдістері кедір-бұдыр деңгейінде де, оның геометриялық конфигурациясында да текстураның кең ауқымы бар бетті қалыптастыруға мүмкіндік береді. Сонымен қатар, лазерлік өңдеу ылғалдылықты супергидрофильділіктен супергидрофобтылыққа дейінгі төтенше жағдайларға дейін басқаруға мүмкіндік береді. Осы себепті жылу алмасу беттерінің лазерлік модификациясы қайнау процестерін күшейтудің перспективалы құралы болып табылады.

Жоғары энергиялы плазмалық бүрку сонымен қатар қайнаған кезде жылу алмасуды жақсартудың перспективалы және әлі зерттелмеген әдістерін білдіреді, бұл оны әрі қарай зерттеу үшін маңызды бағытқа айналдырады.

Қазіргі уақытта Томск политехникалық университетінде жүргізілген эксперимент нәтижелерін өңдеу жүргізілуде. Көпіршіктердің пішіндері, мөлшері мен саны, олардың пайда болу жиілігі және бетінен бөлінуі зерттеледі. Жылу жүктемесінің жылу беру коэффициентіне (ЖБК) және критикалық жылу ағынына (КЖА) тәуелділігі мен әсері құрылады.

Қорытынды

Қазіргі зерттеулер көрсеткендей, беттік модификация қайнауы күшейтудің ең тиімді әдісі болып табылады. Сонымен, беттік модификация (физикалық және химиялық) қайнау тиімділігін едәуір арттырады, ал микро және нанокұрылымнан сулануды басқаруға дейінгі әдістердің үйлесімі энергияның орташа шығындарымен ЖБК мен КЖА-ның айтарлықтай өсуіне қол жеткізуге мүмкіндік береді.

Бифильді беттер жылу алмастырғыш материалдардың жаңа буыны болып табылады, өйткені бұл беттер ылғалдануды басқарудың арқасында ЖБК мен КЖА-ны бір уақытта арттыруды қамтамасыз етеді.

Наноқабаттары бар микроарналық құрылымдар микроэлектроника мен энергетикалық қондырғылардың болашақ термиялық басқару жүйелерінің ең перспективалы бағыты мен негізін құрайды.

Негізгі қиындықтар – бұл жабынның деградациясы, әмбебап КЖА модельдерінің болмауы және технологияны масштабтаудың күрделілігі. Сондықтан болашақ зерттеулер көп деңгейлі беттерді біріктіруге және болжамды модельдерді құруға бағытталуы керек.

REFERENCES

1 Mori, S., Utaka, Y. Critical heat flux enhancement by surface modification in a saturated pool boiling : A review, *Int. J. Heat Mass Transf.* – 108. – 2017. – P. 2534–2557.

2 Popov, I. A., Shchelchkov, A. V., Gortyshov, Y. F., Zubkov, N. N. Heat transfer enhancement and critical heat fluxes in boiling of microfinned surfaces, // *High Temp.* – 55 – 2017 – P. 524–534.

3 Volodin, O. A., Pecherkin, N. I., Pavlenko, A. N. Heat Transfer Enhancement at Boiling and Evaporation of Liquids on Modified Surfaces – A Review, *High Temp.* – 59 – 2021 – P. 405–432.

4 Emelyanenko, K. A., Emelyanenko, A. M., Boinovich, L. B. Laser Obtained Superhydrophobic State for Stainless Steel Corrosion Protection, a Review, *Coatings.* – 2023. – Vol. 13. – P. 194. 13.

5 Liu, B., Liu, J., Zhang, Y., Wei, J., Wang, W. Experimental and theoretical study of pool boiling heat transfer and its CHF mechanism on femtosecond laser processed surfaces, *Int. J. Heat Mass Transf.* – 132. – 2019 – P. 259–270.

6 Može, M., Zupančič, M., Hočevar, M., Golobič, I., Gregorčič, P. Surface chemistry and morphology transition induced by critical heat flux incipience on laser-textured copper surfaces, *Appl. Surf. Sci.* 490. – 2019. –P. 220–230.

7 Sitar, A., Može, M., Crivellari, M., Schille, J., Golobič, I. Nucleate pool boiling heat transfer on etched and laser structured silicon surfaces, *Int. J. Heat Mass Transf.* 2020. – P. 147.

8 Zupančič, M., Može, M., Gregorčič, P., Sitar, A., Golobič, I. Evaluation of enhanced nucleate boiling performance through wall-temperature distributions on PDMS-silica coated and non-coated laser textured stainless steel surfaces, *Int. J. Heat Mass Transf.* – 111 – 2017 – P. 419–428.

9 Kim, N., Son, H. H., Kim, S. J. Oxidation effect on pool boiling critical heat flux enhancement of Cr-coated surface for accident-tolerant fuel cladding application, *Int. J. Heat Mass Transf.* – 144. – 2019 P. 118–655.

10 Sahu, R. P., Sinha-Ray, S., Sinha-Ray, S., Yarin, A. L. Pool boiling on nano-textured surfaces comprised of electrically-assisted supersonically solution-blown, copper-plated nanofibers: Experiments and theory, *Int. J. Heat Mass Transf.* 87. – 2015 – P. 521–535.

11 Dewangan, A.K., Kumar, A., Kumar, R. Experimental Study of Nucleate Pool Boiling of R-134a and R-410a on a Porous Surface, *Heat Transf. Eng.* 40 – 2019. – P. 1249–1258.

12 Ranjan, A., Priy, A., Ahmad, I., Pathak, M., Khan, M. K., Keshri, A. K. Heat Transfer Characteristics of Pool Boiling with Scalable Plasma-Sprayed Aluminum Coatings, *Langmuir.* – 39. – 2023 – P. 6337–6354.

13 Tetreault-Friend, M., Azizian, R., Bucci, M., Mckrell, T., Buongiorno, J., Rubner, M., Cohen, R. Critical heat flux maxima resulting from the controlled morphology of nanoporous hydrophilic surface layers, *Appl. Phys. Lett.* – 108 2016 – P. 9–21.

14 Cheng, H. C., Jiang, Z. X., Chang, T. L., Chen, P. H. Effects of difference in wettability level of biphilic patterns on copper tubes in pool boiling heat transfer, *Experimental Thermal and Fluid Science*, 2021. – Vol. 120. – № July – 2020. – P. 110–241.

15 Xia, Y., Gao, X., Li, R. Influence of Surface Wettability on Bubble Formation and Motion, *Langmuir*, – 2021. – Vol. 37. – № 49. – P. 14483–14490.

16 Mandsberg, N. K., Hansen, O., Taboryski, R. Generation of micro-droplet arrays by dip-coating of biphilic surfaces; The dependence of entrained droplet volume on withdrawal velocity, *Scientific Reports*, – 2017. – Vol. 7. – № 1. – P. 1–9.

17 Pontes, P., Cautela, R., Teodori, E., Moita, A.S., Moreira, A. L.N. Experimental description of bubble dynamics and heat transfer processes occurring on the pool boiling of water on biphilic surfaces, *Applied Thermal Engineering*, – 2020. – Vol. 178. – P. 115507.

18 Han, T., Choi, Y., Kwon, J. T., Kim, M. H., Jo, H. J. Evaporation-crystallization method to promote coalescence-induced jumping on superhydrophobic surfaces, *Langmuir*. – 2020. – Vol. 36. – № 33. – P. 9843–9848.

19 Xia, Y., Gao, X., Li, R. Surface effects on Sub-cooled pool boiling for smooth and laser-ablated silicon surfaces, *International Journal of Heat and Mass Transfer*. – 2022. – Vol. 194. – P. 123113.

20 Može, M., Zupančič, M., Golobič, I. Pattern geometry optimization on superbiphilic aluminum surfaces for enhanced pool boiling heat transfer, *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 2020. – Vol. 161.

03.12.25 ж. баспаға түсті.

04.12.25 ж. түзетулерімен түсті.

05.12.25 ж. басып шығаруға қабылданды.

*Д. Т. Музапаров¹, О. М. Талипов²

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

Поступило в редакцию 03.12.25.

Поступило с исправлениями 04.12.25.

Принято в печать 05.12.25.

СОВРЕМЕННЫЕ МЕТОДЫ ИНТЕНСИФИКАЦИИ ТЕПЛООБМЕНА ПРИ КИПЕНИИ НА МОДИФИЦИРОВАННЫХ ПОВЕРХНОСТЯХ

Представлен обзор современных методов пассивной интенсификации теплообмена при кипении на поверхностях теплообмена с модифицированной текстурой и заданной смачиваемостью. Современные тенденции развития энергетики, микроэлектроники и аэрокосмической отрасли характеризуются непрерывным ростом тепловыделения, что требует создания высокоэффективных систем охлаждения для теплонагруженного оборудования. Среди существующих систем охлаждения, системы, основанные на кипении теплоносителя, остаются наиболее распространенными, однако для отвода тепловых потоков высокой плотности необходимы решения, позволяющие значительно увеличить коэффициент теплоотдачи (КТО) и критический тепловой поток (КТП). Наиболее перспективными являются пассивные подходы интенсификации, базирующиеся на изменении приповерхностных свойств и морфологии поверхностей теплообмена. В статье систематизированы новейшие достижения в данной области, включая лазерную, химическую и физическую модификацию поверхностей, а также создание паттернов различной смачиваемости (гидрофильно-гидрофобные структуры). На основе анализа публикаций последних лет рассмотрены технологии нанесения функциональных покрытий, такие как магнетронное напыление, электрохимическое анодное травление, а также различные методы наноструктурирования и текстурирования. Особое внимание уделено фундаментальному влиянию смачиваемости (гидрофильности и гидрофобности) на процессы нуклеации паровых пузырей, динамику режимов кипения. Проведено обсуждение эффективности различных методов обработки по КТО, КТП и устойчивости к термической деградации в длительном режиме эксплуатации. Отдельно рассмотрены комбинированные гибридные подходы, объединяющие модификацию поверхности с микроканальными структурами и нанопокрывтиями,

демонстрирующие синергетический эффект. В заключение сформулированы направления для дальнейших исследований, среди которых – разработка прогностических моделей для расчета КТП сложных гибридных структур, повышение долговременной стабильности и механической прочности функциональных покрытий в экстремальных тепловых условиях, а также вопросы масштабирования и внедрения рассмотренных технологий в реальную промышленную теплотехнику.

Ключевые слова: кипение, коэффициент теплоотдачи, критический тепловой поток, модификация поверхности, смачиваемость, наноструктуры, микроканалы, бифильные поверхности.

*D. T. Muzaparov¹, O. M. Talipov²

^{1,2}Toraighyrov University, Republic of Kazakhstan, Pavlodar.

Received 03.12.25.

Received in revised form 04.12.25.

Accepted for publication 05.12.25.

MODERN METHODS FOR INTENSIFYING HEAT TRANSFER DURING BOILING ON MODIFIED SURFACES

An overview of modern methods of passive intensification of heat transfer during boiling on heat transfer surfaces with modified texture and specified wettability is presented. Current trends in the development of energy, microelectronics, and the aerospace industry are characterized by continuous growth in heat generation, which requires the creation of highly efficient cooling systems for heat-loaded equipment. Among existing cooling systems, those based on heat transfer fluid boiling remain the most common, but solutions that significantly increase the heat transfer coefficient (HTC) and critical heat flux (CHF) are needed to dissipate high-density heat fluxes. The most promising are passive intensification approaches based on changing the surface properties and morphology of heat exchange surfaces. The article systematizes the latest achievements in this field, including laser, chemical, and physical modification of surfaces, as well as the creation of patterns with different wettability (hydrophilic-hydrophobic structures). Based on an analysis of recent publications, technologies for applying functional coatings, such as magnetron sputtering, electrochemical anodic etching, and various methods of nanostructuring and texturing, are considered. Particular attention is paid to the fundamental influence

of wettability (hydrophilicity and hydrophobicity) on the processes of vapor bubble nucleation and boiling dynamics. The effectiveness of various treatment methods was discussed in terms of HTC, CHF and resistance to thermal degradation during long-term operation. Combined hybrid approaches that combine surface modification with microchannel structures and nanocoatings, demonstrating a synergistic effect, were considered separately. In conclusion, directions for further research are formulated, including the development of predictive models for calculating the CHF of complex hybrid structures, improving the long-term stability and mechanical strength of functional coatings in extreme thermal conditions, as well as issues of scaling and implementation of the considered technologies in real industrial heat engineering.

Keywords: boiling, heat transfer coefficient, critical heat flux, surface modification, wettability, nanostructures, microchannels, biphilic surfaces.

FTAMP 44.01.05

<https://doi.org/10.48081/FXLT3074>

***А. С. Расмухаметова¹, К. С. Олжабаева²,
Ж. Г. Қазыбек³, А. Е. Нұрғали⁴, Н. А. Нұрқасен⁵**

^{1,2,3,4,5}Ғұмарбек Дәукеев атындағы Алматы энергетика және байланыс университеті, Қазақстан Республикасы, Алматы қ.

¹ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-1376-6112>

²ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-2018-8835>

³ORCID: <https://orcid.org/0009-0003-0230-8308>

⁴ORCID: <https://orcid.org/0009-0000-3678-9099>

⁵ORCID: <https://orcid.org/0009-0007-9315-7312>

*e-mail: a.rasmukhametova@aes.kz

КҮН ПАНЕЛЬДЕРІНІҢ СИПАТТАМАЛАРЫН ЗЕРТТЕУ

Ұсынылған мақаланың негізгі мақсаты – қолданылатын фотоэлектрлік жүйелердің түрлері мен олардың құрамдарына, негізгі блоктар мен фотоэлектрлік қондырғылардың жұмыс жасау принциптеріне зерттеу жұмыстарын жүргізу болып табылады.

Мақалада күн батареяларының вольт-амперлік сипаттамасы және сондай-ақ жүктеме сипаттамасы жасалған. Сонымен қатар, 400 Вт күн панелінің вольт-амперлік сипаттамасының анықтау нәтижелері келтірілген және белгілі бір күн панелінің оңтайлы жүктемесін модельдеу, вольт-амперлік сипаттамасын зертханалық зерттеулер нәтижесімен салыстыру толыққанды жүргізілген. Зерттеу барысында алынған шамалар негізінде күн батареясының элементтерінің вольт-амперлік сипаттамасы құрылған болатын. Осының арқасында фотоэлектрлік компоненттің қуатын бағалауға жақсы мүмкіндік туындайды. Фотоэлектрлік жүйелерді жобалау кезінде алдын-ала модельдеу фотоэлектрлік жүйенің жұмысының әртүрлі конфигурация жағдайын қарастыруға, энергетикалық тиімділікті арттыру үшін технологиялық шешімдерді модельдеп алуға жол ашады. Модельдеу үшін қолданылатын арнайы бағдарлама Matlab Simulink қосымшасы арқылы жүзеге асырылды. Өзірленген модель температура, жарық, сәулелердің түсу бұрышы, фотоэлементтердің деградациясы секілді әртүрлі факторлардың әсерін зерттеуге, сондай-ақ вольт-амперлік сипаттамасының (BAC) және ватт-вольттік сипаттамасының (BVC) графиктерін құру

арқылы фотоэлементтің жұмысы туралы толық әрі көрнекі түсінік алуға мүмкіндік береді.

Кілтті сөздер: монокристалды күн батареясы, гибридті фотоэлектрлік инвертор, жүктеме, вольт-амперлік сипаттама, жартылай өткізгіш.

Кіріспе

Күн электр станциялары қазіргі таңда көптеген адамдардың күнделікті өмірінде кеңінен қолданылады, олардың жұмыс істеу принципі тікелей күн сәулелерінің энергиясынан электр энергиясын өндіруге негізделген. Күн сайын жұмыс істейтін панельдердің саны мен олардың өндіретін қуаты артып келе жатқаны да ақиқат.

Күн қондырғыларын жасау үшін, жартылай өткізгіш ретінде көп кремний қолданылады, ол жартылай өткізгіш қызметін атқарады және панель бетіне түскен күн сәулесінен электр тоғын өндіреді. Айта кету керек, ол үшін пайдалы әсер коэффициенті жоғары, монокристалды таза кремний қолданылады. Панельді құрастыру кезінде әр ұяшықтың жүйелері қаншалықты сапалы орындалғанына ерекше назар аударылу керек, себебі батарея қуаты қанша болатыны маңызды әрине, бірақ бұл ең бастысы емес, әр кезде сапа әр элементте жоғары болу керек [1, 9-6].

Әрбір ұяшықтың өлшемі – ең маңызды параметр болып табылады, және де ол әр панельде әртүрлі өлшемдер болғанына қарамастан, әр жеке батареядағы әр ұяшықтың өлшемдері қалғандарымен бірдей болуы қажет деген сөз. Мұндай қатаң талаптар әрбір элементтің сапасына тікелей байланысты, себебі әрбір кішкентай элементтің сапасы неғұрлым жоғары болса, жалпы орнату сапасы және шығыс қуаты соғұрлым жоғары болады.

Күн панелінің вольт-амперлік сипаттамасы тиімділікке тікелей байланысты және ең алдымен ол бағалау орнату кезінде қарастырылатын маңызды параметрлердің бірі. Жалпы орнату қуаты әр ұяшықтың қуатының қосындысы екенін ескере отырсақ, барлығы пайдаланылатын әр ұяшықты бағалауға дейін жеңілдетіледі. [2, 3-6].

Жалпы айтқанда, вольт-амперлік сипаттама токтың оған қолданылған тізбек бойымен өткен кернеуге байланысты қалай өзгертетінін көрсетеді. Күн электр станциялары үшін жасалған арнайы стандартты вольт-амперлік сипаттама көрсеткіштері бар, олар кез келген елде күн панельдерінің әр түрлі модельдерінде вольт-амперлік сипаттамасын жобалау үшін пайдаланылады. Панельдің вольт-амперлік сипаттамасын өлшеу үшін оны 45° ендікке орналастырады, ондағы температура 25°C -қа тең етіп орнатылады, ал батареялардың әр шаршы метріне түсетін сәулелердің қуаты 1000 Вт болуы керек [3, 23-6].

Материалдар мен әдістері

Күн сәулесінің энергиясын электр энергиясына айналдыру, электр панельдерінің вольт-амперлік сипаттамасын зерттеу деген, фотоэлектрлік энергия генерациясы жартылай өткізгіште электромагниттік сәулеленуді сіндірген кезде оң және теріс заряд тасымалдаушылардың кеңістіктік бөлінуіне байланысты және электр өрісі болған кезде бұл зарядтар сыртқы тізбекте электр тоғын тудыруы мүмкін.

Жартылай өткізгіш немесе металл-жартылай өткізгіш шамамен 0,5В потенциалдар айырымен және $200 \text{ A} \cdot \text{m}^2$ ток тығыздығын, $1 \text{ кВт} \cdot \text{m}^2$ инсоляция мөлшері кезінде тудырады. Орташа сәулелену кезінде, өнеркәсіптік фотоэлементтердің пайдалы әсер коэффициенті 10-20 % жетеді, және күніне 1-2 кВт·ч·м² электр энергиясын өндіреді.

Панель түрі: шағын Silasolar 400W (Twin Power).

Sila Solar 400W PERC 5 BB (TP) бұл – монокристалды Half cell PERC технологиясы қолданылған күн панелі, ПӘК-і 22,05 % және қуаты 400 Вт панелінің габариттерімен сәйкес, яғни бірлік аумақтан 14 %-ға артық қуат алынады [4, 111-6]. Бұл күн панелі автаномды немесе резервтік электрмен жабдықтау жүйелерінде қолданылады. Толықтық үшін бұл жүйеде аккумуляторлық батареялар, инверторлар және заряд контроллері қолданылады [5; 6].

Жалпы параметрлер:



SIM 400-24-5 BB-PERC (Twin Power) моделі;

Түрі: монокристалды PERC (Twin Power);

Қуаты 400 Вт;

Элементтер саны 144 дана (12 x 12);

Жұмыс тоғы 9,92 А;

Жұмыс кернеуі 40,36 В;

Қысқа тұйықталу тогы 10,86 А;

Максималды кернеу 1000 В;

Қызмет ету мерзімі кемінде 30 жыл;

Температура режимдері – 40 °С + 85 °С;

10 кВт гибриді фотоэлектрлік инвертор жүктемені қолдана отырып, қосылған жүктемелерді фотоэлектрлік энергия және желі энергиясы мен батарея энергиясы арқылы қуаттай алады [7; 8].

Нәтижелер және талқылау

Жүктеме режиміне байланысты күн панельдерінен, аккумуляторлық батареялардан және желіден тұрақты қуатпен қамтымасыз еті үшін бағытталған. Кіріс максималды қуат кернеуі VMPP диапазонда орналасқан кезде, инвертор, электр энергиясын, максималды тиімді түрлендіреді. Бұл инвертор тек монокристалдық және поликристалдық үлгідегі фотоэлектрлік модульдермен үйлесімді. Басқа типті күн панелдерін рұқсат етілмейді. Және күн панельдер жүйесінің оң немесе теріс ток тізбектерін жерлендіруге болмайды, және де 1-суретте желіге қосылған, гибриді инверторлы күн электр станциясының жүйелік схемасы көрсетілген.

Жұмысты орындау тәртібі:

1 QF1 машинасын қосу арқылы зертханалық стендке кернеу берілді.

2 жүктемесінің кедергісін және ең жоғары кедергісіне сәйкес келетін жағдайға орнатылды.

3 FC1 күн панелінің бетіне жарық ағынын жасайтын SB2 түймесі арқылы EL1 шамы қосылды.

4 жүктеме кедергісін өзгерту жолымен мәнінен мәніне дейін өзгеруі арқылы, 1-кестеге PV1 вольтметр (жүктемедегі кернеу U_n) және PA1 амперметр (жүктемедегі ток) көрсеткіштері енгізілді. Кедергіні өзгерту сатысы $1 \pm 0,1$ В шегінде алынды.



1-сурет – Күн ЭС функционалдық схемасы

48 В 380 В күн инверторы, бір фазалы және үш фазалы желілік гибриді инвертор.



2-сурет – 10 кВт гибриді фотоэлектрлік инвертор

ВАС жүктемесінің белгілі параметрлері кезінде және P_n берілген мәні кезінде V_n және U_n шамалары бірлескен шешімде немесе 3-а суреттіндегідей графикалық түрде дәйекті жақындау әдісімен табылады.

5. Ом заңы бойынша алынған барлық көрсеткіштер үшін жүктеме кедергісін анықталды. Нәтижелер 1-кестеге енгізілген.

6. Формула бойынша алынған барлық көрсеткіштер үшін жүктемеге күн батареясы беретін P қуаты есептелді. Нәтижелер 1-кестеге енгізілді.

7. Жүктеме сипаттамасының графигі бойынша күн батареясы беретін ең жоғары қуаты. U_n опт. кернеуі анықталды.

8. Ал енді 1-кесте бойынша күн батареясы сипаттамасының P және $F(U_n)$ жүктемесіне сәйкес вольт-амперлік сипаттамасы құрылды.

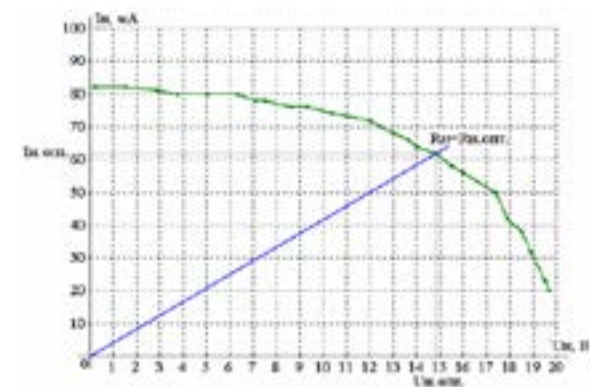
I-кесте – Күн элементтері батареясының вольт-амперлік сипаттамасын алу нәтижелері

$U_H, В$	$I_H, мА$	$R_H, Ом$	$P, мВт$
0,2	82	2,44	20
1,5	82	18,3	120
2,9	81	35,8	230
3,8	80	47,5	300
5	80	62,5	400
6,1	80	76,25	488
7	79	88,6	553
8,5	78	108,9	663
9,2	78	117,9	717
10,2	73	139,7	744
12	71	169	852
13	69	188,4	897
13,8	65	212,3	897
14	62	225,8	868
14,9	61	244,2	908
15,4	58	265,5	893
16	56	285,7	896
17,2	50	344	875
17,9	41	436,5	733
18,5	38	486,8	703
19	31	612,9	589
19,5	23	847,8	448

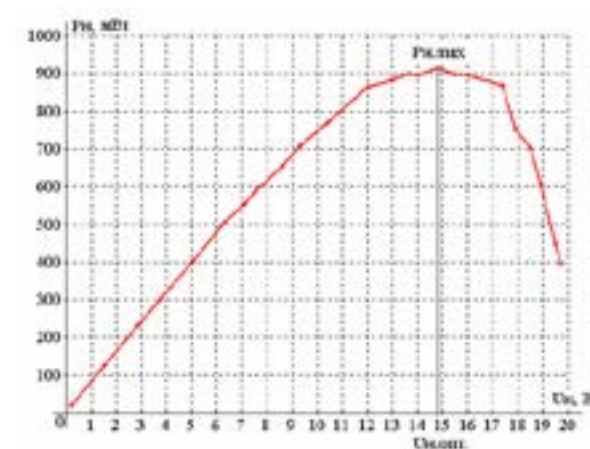
9 Вольт-амперлік сипаттаманың кестесі бойынша (3-сурет) $I_{H, опт}$ күн батареясының беретін ең жоғары қуатына сәйкес келетін разряд. Графиктегі $I_H = f(U_N)$ нүктесі $U_N = U_{N, опт}$ нүктесі болып табылады. $R_{H, опт}$ жүктеменің оңтайлы кедергісіне сәйкес келеді.

$$I = \frac{P_{max}}{U_{H, опт}} = \frac{908}{14,9} = 61 \text{ мА,}$$

$$R_{H, опт} = \frac{U_{H, опт}}{I} = \frac{14,9}{0,061} = 244,2 \text{ Ом}$$



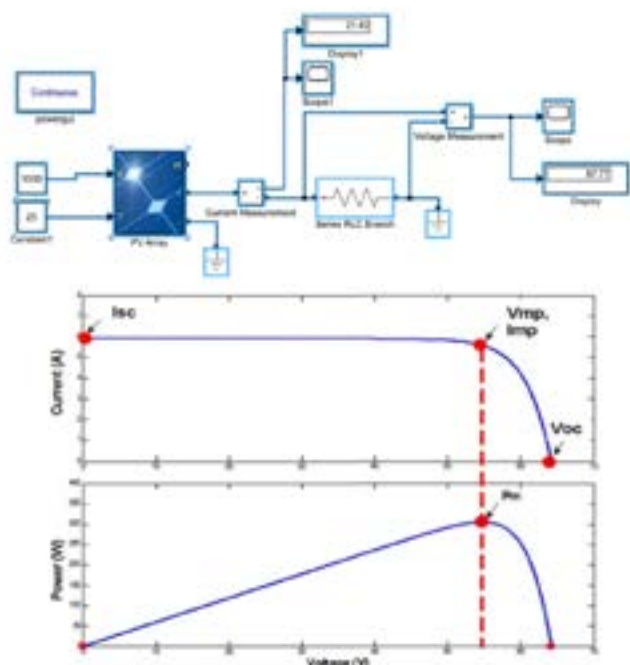
3-сурет –Күн элементтерінің вольт-амперлік сипаттамасы



4-сурет –Күн батареялары жүктемесінің сипаттамасы

Фотоэлектрлік жүйелерін жобалау кезінде алдын-ала модельдеу үлкен тиімділікті көрсетеді, бұл жобалау кезеңінде осындай жүйелерді зерттеуге мүмкіндік береді. Модельдеу арқылы, нақты жағдайлар үшін фотоэлектрлік жүйенің тиімділігін осы технологияны қолданудың арқылы, алдын ала орындылығына баға беру үшін қолдануға болады. Фотоэлектрлік жүйенің жұмысын әртүрлі конфигурация жағдайын қарастыруға, энергетикалық тиімділікті арттыру үшін технологиялық шешімдерді модельдеп алуға қол ашады. Компьютерлік модельдеудің экспериментке қарағанда

артықшылығына жұмыс барысының жылдамдығын, үнемділігін және икемділігін жатқызуға болады [8, б- 15].



5-сурет – MATLAB SIMULINK бағдарламасында 400 ватт күн панелін (PV) модельдеу

Сурет 6 – MATLAB SIMULINK программасындағы күн батареясының вольт-амперлік сипаттамасы

2-кесте – MATLAB SIMULINK-дағы күн батареясының вольт-амперлік сипаттамасының нәтижелері

№ ПП	R, Ом	U, В	I, А
1	1	10,75	10,75
2	2	21,28	10,64
3	3	31,58	10,50
4	4	40,01	10
5	5	43,39	8,67
6	6	44,68	7,4

7	7	45,54	6,5
8	8	46,58	5,8
9	9	46,5	5,1
10	10	47,7	4,7
11	11	47,1	4,2
12	12	47,39	3,9
13	13	132,7	10,2

Бұл жұмыста келесі фотоэлектрлік жүйе элементтерінің үлгілері ұсынылған: фотоэлектрлік модуль, заряд контроллері, қосылатын жүктеме, аккумуляторлық батарея.

Әзірленген модель әртүрлі факторлардың әсерін зерттеуге (температура, жарық, сәулелердің түсу бұрышы, фотоэлементтердің деградациясы) және де ВАС және ВВС графиктерін құру арқылы фотоэлементтің жұмысы туралы көрнекі түсінік алуға мүмкіндік береді [9; 10].

Ұсынылған модель келесі мүмкіндіктерді береді:

- фотоэлементтердің ішкі сипаттамаларын баптау: қысқа тұйықталу тоғын, бос жүріс кернеуін және температуралық коэффициенттерін;
- қоршаған ортаның жағдайының шамаларын статикалық немесе динамикалық өзгертін етіп орнату арқылы моделдеу: күн сәулесінің түсу бұрышын, жарықтандыру деңгейін, температурасын;
- ВАС және ВВС графиктерін алу.

Қорытынды

Ұсынылған, токтың кернеуге тәуелділігі графигінде жартылай өткізгіш түрлендіргішті сипаттайтын ең маңызды нүктелер көрсетілген, сонымен қатар қисығы суреттелген, осының арқасында фотоэлектрлік компоненттің қуатын бағалауға болады. Мұнда жұмыс кернеуі жүйенің қуаты максималды болатын кернеу ретінде қабылданады, жұмыс тогы-бұл жұмыс кернеуінде өтетін ток, ал ток нөлге кезінде қуаты да оған тең болғандықтан, бұл шамада жүйе жұмыс істемейтін жағдайда болады. Ол нақты ток пен кернеу берілген жұмыс параметрлеріне жақындаған кезде ғана жұмыс күйіне өтеді.

Әдетте батарея, теорияда айтылғандай, қажетті қуатты көптеген ұяшық санынан алады, дегенмен едәуір бөлігі кернеуінің төмендеуін өтеуге кетеді, бұл қондырғының күн сәулесінің әсерінен қызу салдарынан. Температура нормадан әр градусқа жоғарлаған сайын бос жүріс кернеуі сәйкесінше 0,4 % - ға төмендейді, температура сол градусқа жоғарлау кезінде қысқа тұйықталу тогы 0,07 % - ға артады. Элементтің тиімділігін есептеу үшін оның ең үлкен қуаты күн радиациясының жалпы қуатына бөлінеді, элементтер бір-бірімен тізбекті немесе параллель электр тізбегіне қосылады.

ПАЙДАЛАНЫЛҒАН ДЕРЕКТЕР ТІЗІМІ

- 1 ГОСТ Р МЭК 60904-1-2013. ПРИБОРЫ ФОТОЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ – Часть 1. Измерение вольтамперных характеристик. – Введ. 2015-01-01. – М. : Стандартинформ, 2014. – 12 с.
- 2 Технические характеристики SIM400-24 (5BB) [Электронный ресурс]. – URL: <https://nsk-electro.ru/custom/manual/SILA/solar/SIM400-24-PERC-TP-RUS.pdf>.
- 3 Андреев, В. М., Грилихес, В. А., Румянцев, В. Д. Фотоэлектрическое преобразование концентрированного солнечного излучения. – Л. : Наука, 1989. – 310 с.
- 4 Бринкворт, Б. Солнечная энергия для человека / пер. с англ. В.Н. Оглоблевой; под ред. и с предисл. Б.В. Тарнижевского. – М. : Мир, 1976. – 291 с.
- 5 Лигачев, В. А., Попов, А. И. Лабораторная работа «Спектральная чувствительность и вольт-амперная характеристика солнечного элемента» по курсу «Физика и технология устройств на основе некристаллических полупроводников». – М. : Изд-во МЭИ, – 1999. – 15 с.
- 6 Твайделл, Дж., Уэр, А. Возобновляемые источники энергии. – М. : Энергоатомиздат, 1990. – 392 с.
- 7 Premkumar, M., Kumar, C., Sowmya, R. Mathematical Modelling of Solar Photovoltaic Cell/Panel/Array based on the Physical Parameters from the Manufacturer's Datasheet // International Journal of Renewable Energy Development. – 2020. – Vol. 9. – № 1. – P. 7–22. – <https://doi.org/10.14710/ijred.9.1.7-22>.
- 8 Ndegwa, R., Simiyu, J., Ayieta, E., Odero, N. A Fast and Accurate Analytical Method for Parameter Determination of a Photovoltaic System Based on Manufacturer's Data // Journal of Renewable Energy. – 2020. – Vol. 2020. – P. 1–18. – <https://doi.org/10.1155/2020/7580279>.
- 9 Eteiba, M., Shenawy, E., Shazly, J., Hafez, A. A Photovoltaic (Cell, Module, Array) Simulation and Monitoring Model using MATLAB®/GUI Interface // International Journal of Computer Applications. – 2013. – Vol. 69. – № 6. – P. 14–28. – <https://doi.org/10.5120/11845-7579>.
- 10 Основные характеристики солнечных панелей. Вольт-амперная характеристика (ВАХ) [Электронный ресурс]. – URL: <http://surl.li/sqakf> (Дата доступа: 16.04.2024).

REFERENCES

- 1 GOST R MEK 60904-1-2013. PRIBORY FOTOELEKTRICHESKIE – Chast 1. Izmerenie voltampernykh harakteristik [IEC 60904-1-2013. Photoelectric devices – Part 1: Measurement of photovoltaic current-voltage characteristics]. – Vved. 2015-01-01. – M. : Standartinform, 2014. – 12 p.
- 2 Tehnicheskie harakteristiki SIM400-24 (5BB) [Technical datasheet SIM400-24 (5BB)] [Electronic resource]. – URL: – <https://nsk-electro.ru/custom/manual/SILA/solar/SIM400-24-PERC-TP-RUS.pdf>.
- 3 Andreev, V. M., Griliches, V. A., Rymancev, V. D. Fotoelektricheskoe preobrazovanie konsentrirovannogo solnechnogo izlychenia [Photovoltaic conversion of concentrated solar radiation]. – L. : Nauka, 1989. – 310 p.
- 4 Brinkvort, B. Solnechnaia energiya dla cheloveka [Solar energy for humans] / Perevod s angliiskogo V. N. Ogloblevoi; Red. i predislovie B. V. Tarnijevskii. – M. : Mir, 1976. – 291 p.
- 5 Ligachev, V.A., Popov, A.I. Laboratornaia rabota «Spektralnaia chyvstvitelnost i volt-ampernaia harakteristika solnechnogo elementa» po kursy «Fizika i tehnologia ystroistv na osnove nekrystallicheskih poluprovodnikov» [Laboratory work «Spectral sensitivity and volt-ampere characteristic of solar cell» on the course «Physics and technology of devices based on semiconductors»]. – M. : Izd-vo MEI. – 1999. – 15 p.
- 6 Tvadell, Dj., Yeir, A. Vozobnovlaemye istochniki energii [Renewable energy sources]. – M. : Energoatomizdat, 1990. – 392 p.
- 7 Premkumar, M., Kumar, C., Sowmya, R. Mathematical Modelling of Solar Photovoltaic Cell/Panel/Array based on the Physical Parameters from the Manufacturer's Datasheet // International Journal of Renewable Energy Development. – 2020. – Vol. 9. – № 1. – P. 7–22. – <https://doi.org/10.14710/ijred.9.1.7-22>.
- 8 Ndegwa, R., Simiyu, J., Ayieta, E., Odero, N. A Fast and Accurate Analytical Method for Parameter Determination of a Photovoltaic System Based on Manufacturer's Data // Journal of Renewable Energy. – 2020. – Vol. 2020. – P. 1–18. – <https://doi.org/10.1155/2020/7580279>.
- 9 Eteiba, M., Shenawy, E., Shazly, J., Hafez, A. A Photovoltaic (Cell, Module, Array) Simulation and Monitoring Model using MATLAB®/GUI Interface // International Journal of Computer Applications. – 2013. – Vol. 69 – № 6. – P. 14–28. – <https://doi.org/10.5120/11845-7579>.
- 10 Osnovni harakteristiki soniachnih panelei. Volt-amperna harakteristika (BAH) [Main characteristics of solar panels. Current-voltage characteristic (VAC)] [Electronic resource]. – URL: – <http://surl.li/sqakf> (Accessed: 16.04.2024).

21.10.25 ж. баспаға түсті.
12.11.25 ж. түзетулерімен түсті.
07.12.25 ж. басып шығаруға қабылданды.

* А. С. Расмухаметова¹, К. С. Олжабаева², Ж. Г. Казыбек³,
А. Е. Нурғали⁴, Н. А. Нурқасен⁵
^{1,2,3,4,5}Алматын университеті энергетикасы және байланыс ісінің
Г. Даукеева, Республика Қазақстан, г. Алматы.
Поступило в редакцию 21.10.25.
Поступило с исправлениями 12.11.25.
Принято в печать 07.12.25.

ИЗУЧЕНИЕ ХАРАКТЕРИСТИК ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ПАНЕЛЕЙ

Целью представленной статьи является изучение видов и составов применяемых фотоэлектрических систем, устройств и принципов работы основных блоков и узлов фотоэлектрической установки, разработана вольт-амперная характеристика солнечных элементов и нагрузочная характеристика солнечных элементов. В статье приведены результаты определения Вольт-Амперной Характеристики (ВАХ) солнечной панели мощностью 400 Вт. Проведено моделирование оптимальной нагрузки солнечной панели и сравнение с результатом лабораторного исследования ВАХ. На основе величин, полученных в ходе исследования с получением лабораторных результатов, была создана вольт-амперная характеристика батареи солнечных элементов. Благодаря этому появляется хорошая возможность оценить мощность фотоэлектрического компонента. При проектировании фотоэлектрических систем предварительное моделирование открывает путь к рассмотрению различных конфигурационных условий работы фотоэлектрической системы, моделированию технологических решений для повышения энергетической эффективности. Специальная программа, используемая для моделирования, была реализована через приложение Matlab Simulink. Разработанная модель позволяет изучить влияние различных факторов, таких как температура, свет, угол падения лучей, деградация фотоэлементов, а также получить полное и наглядное представление о работе фотоэлемента путем построения графиков ВАХ и ВВХ.

Ключевые слова: монокристаллическая солнечная батарея, гибридный фотоэлектрический инвертор, нагрузка, вольт-амперная характеристика, полупроводник.

*A. S. Rasmukhametova¹, K. S. Olzhabayeva², Zh. G. Kazybek³,
A. E. Nurgali⁴, N. A. Nurkasen⁵
^{1,2,3,4,5}Gumarbek Daukeev Energo University, Republic of Kazakhstan, Almaty.
Received 21.10.25.
Received in revised form 12.11.25.
Accepted for publication 07.12.25.

A STUDY OF SOLAR PANEL CHARACTERIZATION

The purpose of the presented article is to study the types and compositions of applied photovoltaic systems, devices and principles of operation of the main blocks and units of photovoltaic installation, developed the Volt-ampere characteristic of solar cells and load characteristic of solar cells. The paper presents the results of determining the Volt-Ampere Characteristic of a solar panel with a capacity of 400W. Modelling of the optimum load of the solar panel and comparison with the result of laboratory study of I-V curve is carried out. Based on the values obtained during the study with the laboratory results, a volt-ampere characteristic of the solar cell battery was created. This provides a good opportunity to estimate the power of the photovoltaic component. In the design of photovoltaic systems, preliminary modelling opens the way to the consideration of different configuration conditions of the photovoltaic system, modelling of technological solutions to improve energy efficiency. The specific software used for modelling has been implemented through the Matlab Simulink application. The developed model allows to study the influence of various factors such as temperature, light, angle of incidence of rays, degradation of photovoltaic cells, as well as to obtain a complete and visual representation of the PV cell operation by drawing I-V curve and P-V graphs.

Keywords: monocrystalline solar panel, hybrid solar inverter, load, IV curve, semiconductor.

<https://doi.org/10.48081/RYXB1535>

**E. J. Sarsikeev¹, A. D. Mehdiyev², R. A. Mehdiyev³,
*A. S. Kumatova, R. T. Shaimerdenova⁵**

^{1,3,4,5}Kazakh Agrotechnical Research University named after S. Seifullin,
Republic of Kazakhstan, Astana;

²Karagandinsky Technical University named after Abylkas Saginov,
Republic of Kazakhstan, Karaganda.

¹ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-7209-5024>

²ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-2633-3976>

³ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-5416-3444>

⁴ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-8972-1346>

⁵ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-0241-6961>

*e-mail: anarkumatova2019@dmil.com

DESIGN AND CALCULATION OF A LINEAR RECIPROCATING GENERATOR FOR THERMOACOUSTIC ENGINE

This paper provides an overview of methods for the calculation and design of linear electric generators with permanent magnets for a single-stage thermoacoustic engine operating on the Stirling heat cycle. The proposed methodologies are grouped based on the type of approach used for the calculation. A detailed analysis of the proposed methods and assumptions is conducted, and conclusions are made regarding their feasibility for the design of electric generators with permanent magnets and solid magnetic core elements. The primary assumptions are related to the representation of parameters in the equivalent circuit of the magnetic systems. It is established that the majority of the methodologies do not account for the influence of eddy currents in the solid elements of the magnetic core. It is demonstrated that many approaches aimed at designing electric machines with permanent magnets can be adapted to linear electric generators. The designed linear generator is intended for use in a thermoacoustic device (TAD). The development of the TAD utilized well-established theoretical and practical advancements in the field of thermoacoustics. Several laboratory prototypes were also developed to refine the energy source, which will serve as the foundation

for a cogeneration thermal power plant of ultra-low capacity. This power plant will comprehensively produce both electrical and thermal energy for autonomous consumers.

Keywords: linear generator; reciprocating motion, Stirling, permanent magnet generator; magnetic core, coil.

Introduction

Modern energy production technologies focus on developing systems that can provide electricity efficiently and sustainably while using as few resources as possible. A particularly important area of research is the creation of ultra-low power energy sources for autonomous systems, designed to operate on a wide range of fuels. These systems aim to ensure reliable energy supply for devices that work independently, reducing dependence on traditional power networks and improving overall energy efficiency. One of the promising directions is the development of a thermoacoustic electrical energy source with linear generators featuring reciprocating motion, capable of operating using permanent magnets and inductive elements. Such generators convert the mechanical energy of reciprocating motion into electrical energy [1, p. 148].

One of the key aspects in the design of a linear generator is the stability of the magnetic flux generated by the permanent magnet [2]. Violation of this condition leads to the generation of electromotive force (EMF) in the moving element of the generator and increased heat dissipation due to eddy currents. This can reduce the efficiency of the device and lead to mechanical damage to the magnets, especially if they are made of certain materials.

Materials and Methods

A key requirement in the design of a linear generator is maintaining a constant magnetic flux produced by the permanent magnet [3, pp. 20–25; 4, pp. 3445–3462], as any fluctuations induce an EMF in the moving part, which in turn leads to the formation of eddy currents and subsequent overheating of the magnet beyond allowable limits. This issue is particularly critical for neodymium magnets, which are highly sensitive: even a 1 °C temperature increase results in an approximately 0.3 % decrease in residual induction and a 0.5 % reduction in coercive force. The magnet must be securely fixed in place to ensure that it does not shift or move in regions where the surrounding materials have different magnetic properties. At the same time, it is important that the magnetic flux produced by the armature remains stable and consistent in the solid ferromagnetic sections of the moving element, so that the generator can operate reliably and maintain proper energy conversion. A linear generator is not very efficient and is limited in power to about 1 kW due to economic factors, but it is sufficiently suitable for ultra-low power energy sources. Further increasing its power significantly raises both the cost and

mass, for instance, due to the growing cost of neodymium magnets. Therefore, it remains quite efficient for generating electrical power not exceeding 1 kW. Descriptions of this type of electrical machine and information about their design are provided in [5, p. 253].

Results and Discussion

The designed linear generator is planned to be used at °C. In the development of the Thermoacoustic Device (TAD), well-known theoretical and practical achievements in the field of thermoacoustics, previously discussed in [6, P. 60–66]; [7]; [8, P. 580–582]; [9]; [10]., were used. Various laboratory samples were also developed, on which the energy source was tested. This energy source will later form the basis of a cogeneration heat and power plant of ultra-low capacity. This power plant will simultaneously produce both electrical and thermal energy for autonomous consumers. Figure 1 shows the experimental laboratory energy source based on a one-stage ring TAD with a linear generator.

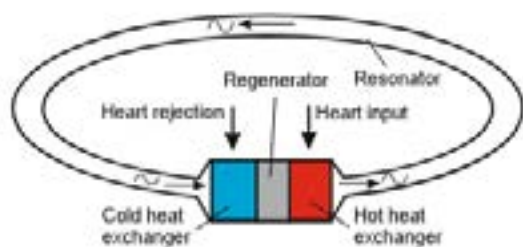


Figure 1 – Single-stage TAD

One of the key requirements in designing a linear generator is ensuring the stability of the magnetic flux produced by the permanent magnet. Any variation in this flux induces an electromotive force in the moving element, leading to the formation of eddy currents and potential overheating of the magnet. This issue is particularly critical for thermally sensitive neodymium magnets, where a temperature increase of just 1 °C results in a 0.3 % decrease in residual induction and a 0.5 % reduction in coercive force. In the proposed design, the magnet must be securely held in place so that it does not move relative to surrounding materials with different magnetic properties. At the same time, it is important to keep the magnetic flux produced by the armature stable and consistent in the parts of the moving element that are made of solid ferromagnetic materials. This ensures reliable operation of the generator and prevents unwanted fluctuations in performance.

The SGL-0.1 prototype is specified as follows: it is a synchronous, two-pole generator with a permanent magnet located on the rotor. Each unidirectional

stroke generates a complete EMF cycle, which corresponds to the maximum linear displacement of 4.21 mm—this value is equal to the tooth pitch of the moving element and ensures that the magnetic circuit undergoes one full change in relative alignment per stroke. Such coordination between the mechanical displacement and the magnetic geometry provides predictable periodicity of the induced EMF and minimizes harmonic distortions in the output signal. The nominal operating frequency of the generator is 50 Hz, achieved under conditions of stable reciprocating motion. The maximum linear speed of the moving element is 661 mm/s, which defines the upper operational limit for the generator while maintaining efficient electromagnetic energy conversion. Operating above this speed could reduce conversion efficiency and cause deviations in the generated EMF. The generator is designed to deliver a nominal electrical output power of 100 W, along with a mechanical conversion force of 302.4 N, which represents the effort required to transform the kinetic energy of the moving element into usable electrical energy. The rectified output voltage is 28 V DC, making the generator compatible with low-voltage storage systems and batteries, and allowing stable integration into autonomous or off-grid energy setups. At the generator terminals, the RMS phase voltage reaches 31 V under nominal conditions, ensuring reliable power delivery to connected loads. Maintaining this voltage and current stability is critical, as variations in speed, load, or magnetic alignment could affect the efficiency and performance of the generator. When paired with a 24-V nominal battery, ensuring efficient charging and compatibility with standard energy-storage configurations. The RMS phase current is 3.23 A under nominal loading conditions. Air cooling is utilized to maintain thermal stability throughout operation, and the generator is intended to work within power systems where the grid frequency does not exceed 60 Hz.

The structural constraints of the design include an inner shaft diameter of no less than 30 mm to ensure sufficient mechanical rigidity and space for auxiliary components. The overall axial length of the generator must not exceed 75 mm, ensuring that the device remains within the specified design envelope. The stator itself has an axial length of 128 mm, while the total length of the housing, including the bearing shields, is 72 mm. These compact dimensions make it possible to integrate the generator into mechanical assemblies with limited space, while still maintaining proper mechanical and magnetic alignment for efficient operation. The minimum air gap is set at 0.3 mm, ensuring both mechanical clearance and the magnetic coupling necessary for stable operation without excessive flux leakage. In the initial position of the generator, the tooth axes of the upper stator stack are aligned with the tooth axes of the outer upper part of the rotor, while simultaneously corresponding to the axes of the slots on the rotor's lower side. After passing through the winding, the flux moves into the right part of the stator,

returns to the rotor, and completes its path at the magnet's south pole, following the route of least magnetic reluctance. It is critical that in the initial position, the flux through the lower stator package is minimal due to the higher magnetic resistance of its path.

When the moving element shifts to the left, the misalignment between the stator and rotor teeth decreases the flux in the upper stator package while increasing it in the lower package.

Theoretical studies, including computer simulations and numerical experiments, were conducted using ANSYS software. The linear generator, shown in Figure 3, incorporates a moving rotor that consists of a shaft (Figure 2); a square permanent magnet with an internal hole, magnetized horizontally; two steel 45 bushings at the magnet edges mounted on the shaft with a rectangular external profile; and rectangular laminations made from 0.5 mm thick electrical steel 2013.



Figure 2 – Laboratory sample of a single-stage TAD

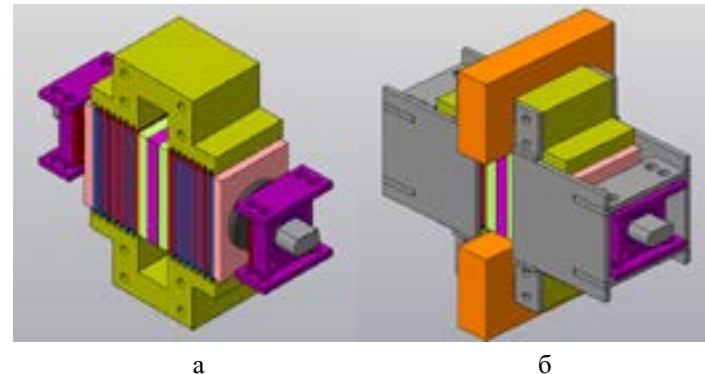


Figure 3 – Computer model of a linear generator

The moving rod, which is connected to the Stirling engine, displaces the moving element relative to a pair of «P-shaped» magnetic cores, each wound with coils. As the moving element travels upward, the magnetic flux coupled with the coils of the upper core increases, while the flux through the coils of the lower core decreases accordingly. The obtained results have been processed and subjected to correlation analysis using Excel software.

The results include the following parameters, calculated as follows:

Active length of each stator (rotor) package – $L_{\text{ак}} = 44\text{ mm}$;

Width of the rotor package at the teeth – 60 mm;

Number of tooth divisions on the rotor package – 7;

Distance between stator packages – 60.6 mm;

Number of teeth on one half of the stator package – $z_1 = 8$;

External dimensions of the magnet – $44 \times 58\text{ mm}$;

Magnet 45SH, residual induction – $B_0 = 1.32\text{ Tл}$; coercive force – $H_c = 10500$

A/cm; coercive force of the magnet – $F_c = 10500 \times 0.7 = 7350$

The flux of the 45SH magnet (preliminary):

$$\Phi_m = S_m B_m / \sigma = [(0.058 \cdot 0.044 - \frac{\pi \cdot 0.02^2}{4}) \cdot 1.32] / 1.05 = 0.00234\text{ Wb}$$

Here: $S_m = 0.002552 - 0.00031 = 0.002244\text{ mm}^2$ – magnet cross-section;
 B_m magnet induction; $\sigma = 1.2$ – magnet scattering coefficient.

Constant component of magnetic conductivity of the air gap:

$$\lambda_0 = \frac{\mu_0}{\delta \cdot k_\delta} = \frac{4\pi \times 10^{-7} \times 0.513}{0.3 \times 10^{-3}} = 2.23 \times 10^{-3} \text{ (H/m2)}.$$

Here: μ_0 – magnetic permeability of air; $\delta = 0.3\text{mm}$ - air gap; k_δ – Carter’s coefficient.

Variable component of air gap conductivity:

$$\lambda_1 = \beta \times \lambda_0 = 0.62^2 \times 2.23 \times 10^{-3} / 2 = 0.43 \times 10^{-3} \text{ (H/m2)}.$$

Here: β – is the air gap conductivity pulsation coefficient. The cross-sectional area of the tooth-slot zone on one half of the stator package:

$$S_m = 7t_s \times L_a = 7 \times 4.21 \times 10^{-3} \times 0.044 = 0.00130\text{mm}^2;$$

Maximum conductivity along the path of the magnet flux through two air gaps:

$$\lambda_{01}^{-3} \text{ max (H/m2)}.$$

Minimum conductivity along the path of the magnet flux through two air gaps:

$$\lambda_{01}^{-3} \text{ min (H/m2)}.$$

Maximum magnetic resistance:

$$R = \frac{1}{\lambda_{\text{min}} \times 0.7 \times 10^{-3} \times 0.0013 \text{ max}}$$

Magnet resistan

$$R = \frac{1}{\lambda_{\text{max}} \times 1.31 \times 10^{-3} \times 0.0013 \text{ max}}$$

$$R_{\text{max}} = \frac{F_c}{B_0 S_m} = \frac{7350}{1.32 \times 0.002552} = 2181890.$$

Simplified magnetic equivalent circuit of the linear generator is presented in Figure 14.

Magnetic flux of the magnet based on the equivalent circuit calculation –

$$F_{\text{ml}} = F_c / R_{\text{max}} = \frac{7350}{2527192} = 0.00291 \text{ Bb}$$

Electromotive force (EMF) of open circuit in a single coil – 15.5 B.

Open-circuit electromotive force (EMF) with a margin for voltage drop – 17.5 Wb.

Number of turns in the coil - 286/

Coil cross-section – $20 \times 20 = 400 \text{ mm}^2$.

Copper fill factor of the slot – 0.85. Wire cross-section (preliminary) – 1.19 mm².

Selection of the wire: PNET- $d_{\text{wire}} = 1.20\text{mm}$; $S_{\text{wire}} = 1.131 \text{ mm}^2$.

$$r_\phi = 2\rho \frac{w_k L_{\text{tot}}}{S_{\text{sp}}} = \frac{2 \times 286 \times 0.172}{57 \times 1.131} = 1.52 \text{ Om}.$$

Coil inductance:

$$L_k = 0.5 \lambda_0 S_m w_k^2 = 0.5 \times 2.23 \times 10^{-3} \times 0.0013 \times 286^2 = 0.1185 \text{ H}.$$

Inductive reactance of the coil:

$$X_k = 2\pi f L_\phi = 37.23 \text{ Om}.$$

The inductive reactance of a phase is determined by passing through two air gaps, since the coils in the phase are connected in opposite directions:

$$L_\phi = 0.5 \times 0.1185 \times 0.1924 = 0.0114 \text{ H};$$

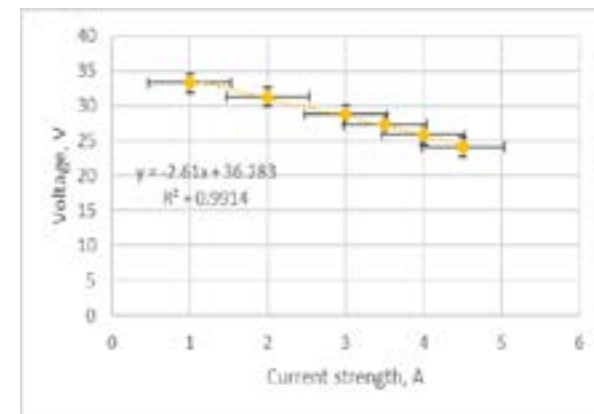


Figure-4 – Dependence of the change in voltage at the terminals of a linear

generator on the increase in load current

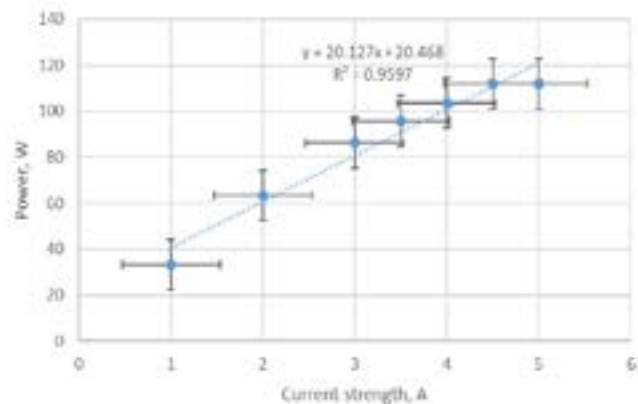


Figure-5 – Dependence of the change in electrical power at the terminals of the linear generator on the increase in load current.

Funding Information

The authors gratefully acknowledge funding from the Committee of Science under the Ministry of Science and Higher Education of the Republic of Kazakhstan, provided through grant No. AP19679083. The grant supports the project focused on creating prototype cogeneration-based alternative energy systems aimed at improving the efficiency of energy supply for autonomous users.

Conclusions

The linear generator is a rather complex electrical machine both in terms of design and calculation, as well as in operation. Its setup process is quite intricate. For electrical power generation above 1 kW, a three-phase synchronous generator with a rotating rotor offers higher efficiency. However, the use of permanent magnets significantly increases the cost of such generators, making them more expensive than other types. Another drawback is their relatively large mass, which can limit their applicability in compact systems. These generators are primarily employed for converting reciprocating motion, where the armature moves back and forth over a fixed distance and at a controlled speed, allowing effective transformation of mechanical energy into electrical energy. Despite all the drawbacks of the designed generator, it is important to note that it is ideally suited for a single-stage thermoacoustic engine operating on the Stirling cycle, which can be used as a power source.

REFERENCES

- 1 **Копылов, А. М.** Совершенствование конструкции синхронной электрической машины возвратно-поступательного действия с применением генетического алгоритма. дис. канд. тех. Наук: Казань. – 2018. 148 с.
- 2 **Высоцкий, В. Е., Шамесмухаметов, С. Л., Старухин, А. А.** Формирование расчетной модели для определения основных характеристик и параметров линейного генератора с постоянными магнитами. Самарский государственный технический университет. [Электронный ресурс]. – URL: – fetmag.mrsu.ru/2009-2/pdf/linear_generator_model.pdf (Дата обращения: 27.01.2025).
- 3 **Крамаров, А. С.** Методика расчета магнитной цепи и выбора постоянных магнитов для линейных вентильных электрогенераторов. Известия вузов. Электромеханика, Южно-Российский государственный технический университет, 2018. – №3. – С. 20–25.
- 4 **Goncharov, V. I., Yezhov, Y. V., Chirkin, V. G., Shirinskii, S. V.** Linear reciprocating generator – sizing equations and mathematical model. Global Journal of Pure and Applied Mathematics. – 12(4). – 2016. – P. 3445–3462.
- 5 **Литвиненко, А. М.** Генератор индукторный. Патент RU 2645949. – № 2016101806; заявл. 20.01.2016; опубл. 28.02.2018.
- 6 **Mekhtiyev, A. D., Sarsikeyev, Y. Zh., Neshina, E. G., Alkina, A. D.** Thermoacoustic engine as a low-power cogeneration energy source for autonomous consumer power supply. Eurasian Physical Technical Journal. – 2021. – 18(12). – P. 60–66. – <https://doi.org/10.31489/2021No2/60-66>.
- 7 **Huntingford, F., Kisha, W.** Algorithmic optimisation of the electrical power output of a low-cost, multicore thermoacoustic engine with varying resonator pressure. Sustainable Energy Technologies and Assessments. – 49. – 2022. – 101776.
- 8 **Farikhah, I., Elsharkawy, E.A., Nuroso, H., Novita, M., Marlina, D., Rahmatunnisa, K.** Study of stack length on efficiency of thermoacoustic engine. 2021 IEEE 3rd Eurasia Conference on IoT, Communication and Engineering (ECICE), Yunlin.T – Taiwan. – 2021. – P. 580–582. – <https://doi.org/10.1109/ECICE52819.2021.9645691>.
- 9 **Sun, D., Luo, K., Zhang, J., Yan, S.W. Yu, Pan, H.** A novel non-linear one-dimensional unsteady model for thermoacoustic engine and its application on a looped traveling-wave thermoacoustic engine. Applied Acoustics. – 181. – 2021. – 108136.

10 Steiner, T.W., Hoy, M., Antonelli, B.K., Malekian, M., Kanemaru, T., Aitchison, W. High-efficiency natural gas fired 1 kWe thermoacoustic engine. Applied Thermal Engineering, 199. – 2021. – 117548.

REFERENCES

1 Kopylov, A. M. Sovershenstvovanie konstruktsii sinkhronnoi elektricheskoi mashiny vozvratno-postupatel'nogo deistviya s primeneniem geneticheskogo algoritma [Improving the design of a synchronous electric machine with reciprocating action using a genetic algorithm]. PhD Dissertation (Technical Sciences), Kazan. – 2018. – 148 p.

2 Vysotskii, V. E., Shamesmukhametov, S. L., Starukhin, A. A. Formirovanie raschetnoi modeli dlya opredeleniya osnovnykh kharakteristik i parametrov lineinogo generatora s postoyannymi magnitami [Formation of a calculation model for determining the main characteristics and parameters of a linear generator with permanent magnets]. Samara State Technical University. [Electronic resource]. – fetmag.mrsu.ru/2009-2/pdf/linear_generator_model.pdf (accessed 27 January 2025).

3 Kramarov, A. S. Metodika rascheta magnitnoi tsepi i vybora postoyannykh magnitov dlya lineinykh ventil'nykh elektrogeneratorov [Methodology for calculating the magnetic circuit and selecting permanent magnets for linear valve electric generators]. Izvestiya Vysshikh Uchebnykh Zavedenii. Elektromekhanika, South Russian State Technical University. – 2018. – No.3. – P. 20–25.

4 Goncharov, V. I., Yezhov, Y. V., Chirkin, V. G., Shirinskii, S. V. Linear reciprocating generator – sizing equations and mathematical model. Global Journal of Pure and Applied Mathematics. – 12(4). – 2016. – P. 3445–3462.

5 Litvinenko, A. M. Generator induktornyi [Inductor generator]. Patent RU 2645949, No. 2016101806; filed 20 January 2016; published 28 February 2018.

6 Mekhtiyev, A. D., Sarsikayev, Y. Zh., Neshina, E. G., Alkina, A. D. Thermoacoustic engine as a low-power cogeneration energy source for autonomous consumer power supply. Eurasian Physical Technical Journal, 2021. – 18(12). – P. 60–66. – <https://doi.org/10.31489/2021No2/60-66>.

7 Huntingford, F., Kisha, W. Algorithmic optimisation of the electrical power output of a low-cost, multicore thermoacoustic engine with varying resonator pressure. Sustainable Energy Technologies and Assessments. – 49. – 2022. – 101776.

8 Farikhah, I., Elsharkawy, E.A., Nuroso, H., Novita, M., Marlina, D., Rahmatunnisa, K. Study of stack length on efficiency of thermoacoustic engine. 2021 IEEE 3rd Eurasia Conference on IoT, Communication and Engineering (ECICE), Yunlin. – Taiwan. – 2021. – P. 580–582. – <https://doi.org/10.1109/ECICE52819.2021.9645691>.

9 Sun, D., Luo, K., Zhang, J., Yan, S.W. Yu, Pan, H. A novel non-linear one-dimensional unsteady model for thermoacoustic engine and its application on a looped traveling-wave thermoacoustic engine. Applied Acoustics. – 181. 2021. – 108136.

10 Steiner, T.W., Hoy, M., Antonelli, B.K., Malekian, M., Kanemaru, T., Aitchison, W. High-efficiency natural gas fired 1 kWe thermoacoustic engine. Applied Thermal Engineering, 199. – 2021. – 117548.

Received 21.10.25.

Received in revised form 14.11.25.

Accepted for publication 05.12.25.

Е. Ж. Сәрсикеев¹, А. Д. Мехмиев², Р. А. Мехмиев³,

*А. С. Қуатова⁴, Р. Т. Шаймерденова⁵

^{1,3,4,5}С. Сейфуллин атындағы Қазақ агротехникалық зерттеу университеті,

Қазақстан Республикасы Астана қ.;

²Әбілқас Сағынов атындағы Қарағанды техникалық университеті,

Қазақстан Республикасы, Қарағанды қ.

21.10.25 ж. баспаға түсті.

14.11.25 ж. түзетулерімен түсті.

05.12.25 ж. басып шығаруға қабылданды.

ТЕРМОАКУСТИКАЛЫҚ ҚОЗГАЛТҚЫШҚА АРНАЛҒАН СЫЗЫҚТЫҚ КЕРІ ГЕНЕРАТОРДЫ ЖОБАЛАУ ЖӘНЕ ЕСЕПТЕУ

Бұл мақалада Стирлинг циклі бойынша жұмыс істейтін бір сатылы термоакустикалық қозғалтқыш үшін тұрақты магниттік сызықтық электр генераторларын есептеу және жобалау әдістеріне шолу жасалады. Ұсынылған әдістер қолданылатын есептеу тәсілінің түріне қарай топтастырылған. Ұсынылған әдістер мен болжамдарға егжей-тегжейлі талдау жүргізілді, олардың тұрақты магниттері мен магниттік ядроның қатты элементтері бар электр генераторларын жобалау үшін қолданылуы туралы қорытындылар жасалды. Негізгі болжамдар магниттік жүйелердің эквивалентті схемасындағы параметрлерді ұсынумен байланысты. Көптеген әдістер магниттік ядроның қатты элементтеріндегі құйынды токтардың әсерін ескермейтіні анықталды. Тұрақты магнитті Электр машиналарын жобалауға бағытталған көптеген тәсілдерді сызықтық электр генераторларына бейімдеуге болатындығы көрсетілген. Әзірленіп жатқан сызықтық генератор термоакустикалық құрылғыда (ТАД) пайдалануға арналған. ТАД-ның дамуы термоакустика саласындағы

жақсы қалыптасқан теориялық және практикалық жетістіктерге сүйенді. Сондай-ақ, ультра төмен қуатты когенерациялық жылу электр станциясының негізі болатын энергия көзін жақсарту үшін бірнеше зертханалық прототиптер жасалды. Бұл электр станциясы Автономды тұтынушылар үшін электр және жылу энергиясын кешенді түрде өндіреді.

Кілтті сөздер: сызықтық генератор, кері қозғалыс, Стирлинг, тұрақты магниттік генератор, магниттік өзек, катушка.

Е. Ж. Сарсикеев¹, А. Д. Мехтиев², Р. А. Мехтиев³,

*А. С. Куатова⁴, Р. Т. Шаймерденова⁵

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

²Карагандинский технический университет имени Абылкаса Сагинова, Республика Казахстан, г. Караганда.

Поступило в редакцию 21.10.25.

Поступило с исправлениями 14.11.25.

Принято в печать 05.12.25.

ПРОЕКТИРОВАНИЕ И РАСЧЁТ ЛИНЕЙНОГО ВОЗВРАТНО-ПОСТУПАТЕЛЬНОГО ГЕНЕРАТОРА ДЛЯ ТЕРМОАКУСТИЧЕСКОГО ДВИГАТЕЛЯ

В данной статье представлен обзор методов расчета и проектирования линейных электрических генераторов с постоянными магнитами для одноступенчатого термоакустического двигателя, работающего по циклу Стирлинга. Предложенные методики сгруппированы в зависимости от типа используемого подхода к расчету. Проведен детальный анализ предложенных методов и допущений, сделаны выводы о их применимости для проектирования электрических генераторов с постоянными магнитами и твердыми элементами магнитного сердечника. Основные допущения связаны с представлением параметров в эквивалентной схеме магнитных систем. Установлено, что большинство методик не учитывают влияние вихревых токов в твердых элементах магнитного сердечника. Показано, что многие подходы, направленные на проектирование электрических машин с постоянными магнитами, могут быть адаптированы для линейных электрических генераторов. Разрабатываемый линейный генератор предназначен для использования в термоакустическом устройстве (ТАД). Разработка ТАД опиралась

на хорошо зарекомендовавшие себя теоретические и практические достижения в области термоакустики. Также было создано несколько лабораторных прототипов для совершенствования источника энергии, который станет основой когенерационной тепловой электростанции ультранизкой мощности. Эта электростанция будет комплексно производить как электрическую, так и тепловую энергию для автономных потребителей.

Ключевые слова: линейный генератор, возвратно-поступательное движение, Стирлинг, генератор с постоянными магнитами, магнитный сердечник, катушка.

<https://doi.org/10.48081/ZVOC2070>

**Н. К. Сейтжаппаров¹, А. К. Мерғалимова²,
А. В. Атякшева³, *С. Б. Ыбрай⁴, Ж. Т. Бекишева⁵**

¹Евразийский национальный университет имени Л. Н. Гумилева, Республика Казахстан, г. Астана;

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

¹ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-7624-1367>

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

³ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-2523-3890>

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

⁵ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-9224-2426>

*e-mail: sultanybray@gmail.com

РАЦИОНАЛЬНЫЕ РЕЖИМЫ ПИРОЛИЗА КАЗАХСТАНСКИХ УГЛЕЙ И ИХ ПРИМЕНЕНИЕ В ПОСЁЛКОВЫХ ЭНЕРГОСИСТЕМАХ

Работа посвящена созданию интегрированной автономной системы энергоснабжения удалённых посёлков на основе частичной газификации (низкотемпературного пиролиза) местных углей. Экспериментально исследованы режимы термообработки углей казахстанских месторождений в интервале 300–600 °С при скоростях нагрева 5–60 °С/мин и различных гранулометриях. Определены выход и состав летучих, а также низшая теплота сгорания образующегося газа (Q_n). Показано, что рациональный диапазон 500–600 °С при мелком помолу (~0–3 мм) и скорости нагрева ~20–30 °С/мин обеспечивает извлечение основной доли летучих и формирование газа с $Q_n \approx 10–12$ МДж/м³ (СО ~50–60 об.% при долях H₂ и CH₄ 10–15 и 5–10 об.% соответственно), пригодного для безмазутной растопки котлов и питания газопоршневых агрегатов. На основе полученных данных разработана технологическая схема поселкового энергокомплекса: газ от пиролиза направляется на генерацию электроэнергии и бытовые плиты, твёрдый остаток (полукокс) используется в водогрейном котле; предусмотрены контуры безопасности (ресивер, арматура, мониторинг). Новизна заключается в установлении количественных

параметров рационального режима для конкретных казахстанских углей и в обосновании практической интеграции «газ + полукокс» в одну энергосистему. Достигается сокращение локальных выбросов по сравнению с индивидуальным сжиганием угля и снижение совокупных эксплуатационных затрат в автономных условиях.

Ключевые слова: частичная газификация, пиролиз угля, полукокс, генераторный газ, безмазутная растопка, слоевой реактор, автономное энергоснабжение.

Введение

Обеспечение энергоносителями отдалённых малых населённых пунктов является сложной научно-технической проблемой, особенно актуальной для Казахстана. Это обусловлено природно-географическими факторами: резко континентальным климатом и большой удалённостью поселений друг от друга и от централизованных сетей (магистральных ЛЭП, нефте- и газопроводов). В таких посёлках сейчас доминируют разрозненные и малоэффективные методы получения энергии. К ним относятся печное отопление углём, использование баллонного сжиженного газа (СУГ) для приготовления пищи, а также электроснабжение от дизель-генераторов или протяжённых устаревших линий. Эти решения имеют существенные недостатки: низкий КПД, высокие потери и эксплуатационные издержки, а также значительное экологическое воздействие (дым, зола) при сжигании угля [1; 2]. Кроме того, баллонный СУГ дорог и требует сложной логистики, а электроснабжение по изношенным сетям ненадёжно и трудно масштабируемо.

Между тем, Казахстан располагает обширной и доступной угольной базой [3], что открывает возможности для разработки комплексных децентрализованных решений. Предлагаемая концепция основана на низкотемпературном пиролизе (частичной газификации) угля на месте потребления. Этот процесс позволяет извлекать из угля летучие горючие компоненты (пиролизный газ) и получать твёрдый остаток (полукокс) с сохранением значительной теплотворности [4]. При этом один и тот же местный ресурс – уголь – становится источником «энергетической триады»: тепло (сжигание полукокса), электроэнергия (газопоршневой агрегат на пиролизном газе) и бытовой газ для нужд населения. Это кардинально отличается от текущего использования угля только для отопления.

Актуальность исследования продиктована необходимостью внедрения высокоэффективных и экологичных технологий для топливно-энергетического комплекса, что соответствует стратегическим приоритетам страны [5]. Энергообеспечение удалённых посёлков с использованием угля как единственного источника нескольких видов энергии является ключевой научной задачей.

Материалы и методы

В экспериментах были использованы образцы углей разных типов, в том числе: высоколетучие бурые и длиннопламенные угли (например, Майкубенское, Каражыра), а также уголь с умеренным и низким выходом летучих (Экибастузское, Сарыадырь). Такой выбор обеспечил репрезентативность по свойствам топлива. Экспериментальная установка. Лабораторные опыты проводились на установке для пиролиза, разработанной в ТОО «Институт химии угля и технологий» (г. Астана). Установка включает горизонтальную нагревательную камеру, снабженную электрическим нагревателем и средствами регулирования температуры и скорости нагрева. В камеру загружался навесок дроблёного угля (размер частиц порядка нескольких миллиметров). Перед началом опыта воздух из камеры откачивался, обеспечивая нагрев образца без доступа кислорода (инертная среда). Это соответствует условиям пиролиза, при которых происходит разложение угля с выделением летучих, но без горения. Температуру нагрева поддерживали в заданном режиме: исследования охватывали диапазон температур от 300 до 600 °С. Нагрев осуществляли как пошагово (удерживая образец при целевой температуре фиксированное время), так и непрерывно с разными скоростями (от 5 до 60 °С/мин) – для изучения влияния этого фактора. Длительность изотермической выдержки или нагрева составляла от 20 минут до 3 часов в разных сериях опытов.

Измерения. Образующийся при термообработке угля газ непрерывно отводился из реактора и подавался в газоанализатор. Для анализа состава был использован хроматографический газоанализатор с детектором, способным регистрировать основные компоненты горючих газов (СО, СО₂, СН₄, Н₂ и др.). Периодически отбирались пробы газа, и определялась объемная концентрация компонентов. По полученному составу рассчитывалось значение низшей теплоты сгорания газа (Q_n) в МДж/м³. Параллельно фиксировался выход газа – объем или масса газообразных продуктов, полученных из определённой навески угля. Твердый остаток (полукокс) взвешивался после охлаждения, что позволяло определить выход твердого продукта и массовый выход летучих (разность между начальной массой топлива и массой остатка). Также проводился технический анализ исходных углей (влажность, зольность, выход летучих по стандарту) и полученного полукокса, чтобы оценить изменение свойств топлива.

Обработка данных. На основе экспериментальных результатов построены графические зависимости выхода летучих и теплоты сгорания газа от параметров нагрева. Для выявления статистически значимых факторов применялся многофакторный регрессионный анализ. В частности, для одного из углей была составлена модель вида $Y = f(X_1, X_2, X_3, \dots)$, где Y – выход газа

(%), X₁ – температура, X₂ – время, X₃ – размер частицы и т.д. Результаты регрессии позволили количественно оценить вклад каждого фактора и определить оптимальные комбинации параметров.

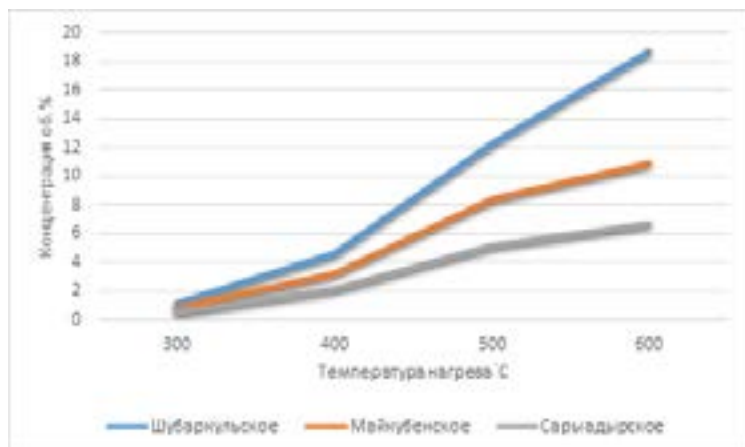
Результаты и обсуждение

Определение оптимальных условия извлечения летучих веществ из угля является одним из значимых показателей. Выполнено экспериментальное исследование влияния режима термического нагрева на выход горючих летучих компонентов. Задача состояла в том, чтобы установить такие условия нагрева угля, при которых выделяется максимальное количество газообразного топлива, пригодного для использования. В результате исследований определено, что решающим фактором является температура нагрева. При повышении температуры с 300 °С до 500–550 °С выход летучих увеличивается многократно, а при дальнейшем повышении до ~600 °С рост замедляется. Таким образом, рациональный диапазон температур нагрева угля составляет примерно 500–600 °С: в этих условиях из угля выделяется основная масса летучих, но ещё не происходит чрезмерного расхода энергии на нагрев и спекания топлива. Важное влияние оказывает дисперсность угля: уменьшение размера частиц приводит к возрастанию выхода газа. Для мелкоизмельчённого угля (фракция ~0–3 мм) выход летучих на 10–15 % выше, чем для крупной фракции, благодаря большей поверхности и более равномерному прогреву. Скорость нагрева имеет чуть менее значимый эффект: было отмечено, что при увеличении скорости нагрева с 5 до 30 °С/мин выход летучих и их теплота сгорания возрастают, но дальнейшее увеличение до 60 °С/мин даёт меньший прирост. Это объясняется тем, что при умеренно высокой скорости нагрева (около 20–30 °С/мин) происходит быстрый разогрев органической массы угля, способствующий интенсивному выделению горючих газов (особенно оксида углерода СО). В то же время чрезмерно высокая скорость приводит к неравномерному прогреву образца и частичному задерживанию летучих внутри пор. Длительность изотермического выдерживания угля при целевой температуре также влияет: было показано, что удержание при 500–550 °С в течение ~30–40 минут обеспечивает более полный выход летучих, чем короткий нагрев в течение 10–15 минут. Однако увеличение времени свыше часа уже незначительно добавляет выход – равновесное состояние достигается [6; 7; 8].

Результаты экспериментальных исследований по определению количественного состава газа, полученного из представленных выше образцов углей различных месторождений, представлены в таблице 1 и рисунке 1.

Таблица 1 – суммарный выход горючих компонентов газа (CO, H₂, CH₄) в диапазоне температур от 300 °С до 600 °С

Месторождение образцов угля	Суммарный выход в зависимости от температуры нагрева, °С			
	300	400	500	600
Шубаркульское	1,2	4,6	12,3	18,7
Майкубенское	0,9	3,2	8,4	10,9
Сарыадырское	0,5	2,1	5,2	6,7

Рисунок 1 – Зависимость выхода горючих компонентов газа (CO, H₂, CH₄) от температуры нагрева

В рамках второй задачи проведены измерения энергетических характеристик газов, полученных из различных углей. Полученные результаты: во всех опытах образующийся пиролизный газ обладал удовлетворительной теплотой сгорания, достаточной для практического использования. Результаты приведены на рисунке 2. Для примера, газ из экибастузского угля при нагреве 20 мин имел низшую теплоту сгорания ~11,7 МДж/м³. Угля Каражыра – порядка 10–11 МДж/м³ при тех же условиях. Увеличение времени нагрева до 40 мин повышало теплоту сгорания на 5–10 % за счёт более полного выхода горючих компонентов. Максимально достигнутые значения Q_n газа составили ~12,5 МДж/м³ (для наиболее богатых летучими углей при длительном нагреве). Эти показатели примерно в 2–3 раза ниже, чем у природного газа (метана) – что естественно, ведь пиролизный газ содержит значительную долю инертных компонентов (CO₂, N₂) и меньше метана. Тем не менее, теплота сгорания >10 МДж/м³ близка к значению

генераторного газа, традиционно применявшегося в газогенераторных автомобилях, и достаточна для работы ДВС. Для уверенности был проведен пробный расчет работы газопоршневого агрегата на таком газе: полученная электрическая мощность соответствовала расчетной, хотя и с небольшим снижением КПД из-за более низкой энергии топлива. Состав газа варьировался в зависимости от режима. При относительно низкой температуре (до 400 °С) в газе присутствовало больше метана (CH₄) и водорода, однако общий выход газа там был мал. В оптимальном режиме (~550 °С) газ состоял в основном из монооксида углерода (CO) – 50–60 об.%, диоксида углерода (CO₂) – 10–15 %, водорода (H₂) – 10–15 %, метана (CH₄) – 5–10 %, остальное – тяжелые углеводороды и пары воды. Преобладание CO объясняется разложением органической массы угля и частичным окислением углерода углекислым газом (реакция C+CO₂→2CO). Отметим, что при повышении интенсивности нагрева доля CO₂ в газе снижалась, а доля CO – увеличивалась, что положительно сказывается на энергетике (CO – горючий, а CO₂ – нет). Небольшое количество CH₄ (метана) присутствует в основном при первых стадиях прогрева; при длительном нагреве метановые углеводороды разлагаются до CO и H₂. Таким образом, получаемый газ по составу близок к типичному генераторному газу угольных газификаторов. Для повышения его теплоты сгорания целесообразно использовать теплоизоляцию реактора и не допускать избыточного окисления. Тем не менее, уже достигнутых ~12 МДж/м³ достаточно, чтобы заменить дорогостоящий мазут при растопке котлов – этот вывод совпадает с результатами [9], которая показала возможность полноценной замены мазута пиролизным газом угля [10; 11].

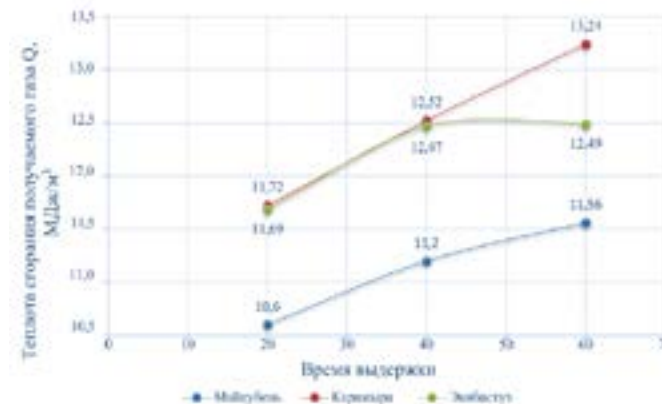


Рисунок-2 – Результаты анализов теплоты сгорания полученных газов в зависимости от времени выдержек при температуре 500 °С

Данная часть результатов посвящена сопоставлению поведения разных углей при частичном пиролизе. Установлено, что выход летучих веществ весьма различается для различных марок топлива. Результаты приведены на рисунке 3. Для углей с высоким исходным содержанием летучих (бурые, длиннопламенные) при нагреве $\sim 500\text{--}550\text{ }^\circ\text{C}$ удаётся извлечь более 30 % от массы угля в виде газообразных продуктов. Конкретно, из Майкубенского угля (марка Д) получен выход летучих около 36 % . Подобные высокие значения свидетельствуют о почти полном выделении всей доступной летучей компоненты (у данного угля содержание летучих по ГОСТ $\sim 38\text{--}40\%$). Напротив, для низколетучих углей (например, уголь Экибастуз – относится к КСН) даже при $600\text{ }^\circ\text{C}$ выход летучих составил лишь $\sim 9\text{--}10\%$, что близко к предельному значению для этого угля (летучих $<17\%$ по анализу). Таким образом, эффективность частичной газификации сильно зависит от природы угля. Богатые летучими угли более пригодны – из них можно получить достаточно газа, оставляя твёрдый полукокс, который всё ещё горюч. Если же уголь малолетучий (антрацит, тощий, энергетический), то объем полученного газа будет невелик, и практический смысл имеет либо применять более высокие температуры, либо смешивать такой уголь с бурым для повышения выхода газа [12; 13].

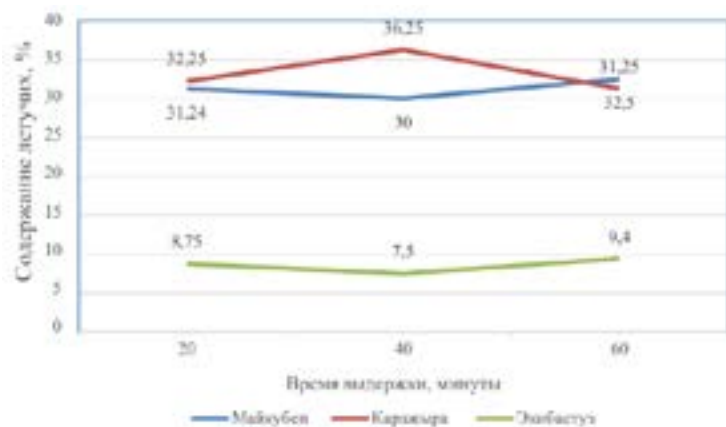


Рисунок-3 – Зависимость выхода горючего газа от времени выдержки при температуре $500\text{ }^\circ\text{C}$ (к рабочей массе сырья)

Кроме того, интенсивность выделения (скорость выхода летучих) была различной. Для оценки этого показателя в экспериментах фиксировали время достижения определенного объема газа. Высоколетучие угли начинали активно газообразовывать уже при $\sim 300\text{ }^\circ\text{C}$, пик скорости наблюдался около 360

$500\text{ }^\circ\text{C}$ и затем снижался. Низколетучие угли демонстрировали заметное газовыделение лишь при $>550\text{ }^\circ\text{C}$. Например, майкубенский уголь выделил 20 % летучих уже за первые 15 минут при $500\text{ }^\circ\text{C}$, тогда как углю Экибастузский требовался час при $500\text{ }^\circ\text{C}$, чтобы достичь 10 %. Таким образом, в реальной установке следует учитывать сорт угля и при необходимости корректировать режим (температуру и время).

Регрессионный анализ данных (на примере Майкубенского угля) подтвердил статистическую значимость влияния температуры и размера частицы на выход летучих (с коэффициентами при этих факторах, соответственно, порядка $+0,3$ и $-0,11$ в нормированных величинах). Это говорит о том, что для увеличения выхода газа эффективнее повысить температуру и измельчить топливо, чем просто дольше нагревать массивный кусок. С другой стороны, было обнаружено, что слишком высокая температура ($>600\text{ }^\circ\text{C}$) может привести к началу экзотермического разложения кокса (начало горения твердого остатка), что нежелательно в режиме частичного пиролиза. Поэтому важно удерживать температуру в оптимальном диапазоне.

Информация о финансировании

Данное исследование публикуется в рамках реализации грантового финансирования научных проектов Министерства науки и высшего образования Республики Казахстан, ИРН AP19675062 «Разработка чистой угольной технологии для получения летучих горючих веществ».

Выводы

Оптимальным режимом получения летучих из угля является нагрев до температуры порядка $550\text{ }^\circ\text{C}$ (в диапазоне $500\text{--}600\text{ }^\circ\text{C}$) с относительно высокой скоростью ($\sim 20\text{--}30\text{ }^\circ\text{C}/\text{мин}$) при мелком помоле угля. За ~ 30 минут при таких условиях извлекается основная доля летучих, достаточная для энергетических целей. Данный режим отличается от традиционного коксования (где температура выше $800\text{ }^\circ\text{C}$ и нужен часовой прогрев) тем, что обеспечивает неполное выгорание – ровно столько, сколько нужно для получения газового топлива. Тем самым задача извлечения необходимого количества летучих решена наиболее экономичным способом.

Экспериментально подтверждено, что пиролизный газ из местных углей обладает теплотой сгорания $10\text{--}12\text{ МДж}/\text{м}^3$, что лишь в 2–3 раза меньше природного газа, но достаточного для энергетических нужд. Состав газа характеризуется высоким содержанием CO (до 60 %), обеспечивающим основную теплотворную способность. Полученные данные новы для конкретных казахстанских углей и важны для проектирования газопоршневых электроагрегатов, оптимизированных под это топливо. Особенностью результата является то, что при относительно низкой температуре нагрева достигается приемлемая энергия газа – ранее в литературе упоминалось

требование >12 МДж/м³, наш газ вплотную приблизился к этому порогу. За счёт подбора режима (более высокая скорость нагрева, подсушка угля) можно достичь и превышения 12 МДж/м³. Тем самым задача по оценке энергоёмкости получаемого топлива решена – газ удовлетворяет критерию пригодности к использованию в автономной энергоустановке.

Изучены особенности термической дегазации различных углей. Показано, что метод частичной газификации целесообразен главным образом для углей с высоким и средним содержанием летучих (бурые, длиннопламенные, газовые), из которых реально извлечь 30–35 % массы в виде газа. Для энергетических и антрацитов эффективность низка (менее 10 % газа), что является ограничением технологии – в таких случаях лучше применять уголь с примесью более летучего или использовать другие подходы (например, подвод внешнего окислителя). Отличие полученных результатов от известных данных состоит в количественной оценке влияния гранулометрического состава и подтверждении на конкретных цифрах предпочтительности «молодых» углей, что ранее качественно отмечалось в литературе. Решена поставленная задача изучения интенсивности пиролиза: для каждого типа угля определены требуемые параметры (для бурых – ~500 °С, для энергетических – нужно >600 °С и т.д.), обеспечивающие максимально возможный выход летучих. Это позволяет рационально подбирать топливо и режим для энергоустановки в зависимости от местной ресурсной базы.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1 Bogdanov, D., Toktarova, A., Breyer, C. Transition towards 100 % renewable power and heat supply for energy intensive economies and severe continental climate conditions: Case for Kazakhstan. [Text] // Applied Energy, – 2019. – № 254. – P. 113606.

2 Smolka-Danielowska, D., Jabłońska, M., Godziek, S. The Influence of Hard Coal Combustion in Individual Household Furnaces on the Atmosphere Quality in Pszczyna (Poland) [Text] // Minerals, – 2021. – № 11. – P. 1155.

3 Dorian, J. Central Asia: A major emerging energy player in the 21st century. [Text] // Energy Policy, – 2006. – № 34. – P. 544–555.

4 Liu, J., Yang, X., Jiang, X., & Jiang, X. Pyrolysis mechanisms of coal extracts based on TG-FTIR and ReaxFF MD study [Text] // Fuel Processing Technology, – 2022. – № 226. – P. 107124.

5 Linn, J. Kazakhstan 2050 [Text] // Global Journal of Emerging Market Economies 2050, – 2014. – № 6. – P. 283–300.

6 Mergalimova, A., Ongar, B., Georgiev, A., Kalieva, K., Abitaeva, R., Bissenbayev, P. Parameters of heat treatment of coal to obtain combustible volatile substances. [Text] // Energy. – 2021. – № 224. – P.148.

7 Онгар, Б., Сарсенбаев, Е. А., Мергалимова, А. К. Чистые угольные технологии, монография [Text] // Алматы – 2023. – С. 349.

8 Алияров, Б. К., Мергалимова, А. К. Пат. 2450. Способ безмазутной растопки котлоагрегатов [Text] // опубл.30.10.2017. – Бюл. № 20.

9 Алияров, Б., Мергалимова, А., Жалмагамбетова, У. Применение технологии термической обработки угля для безмасляного розжига котлов // Латвийский журнал физики и технических наук. – 2018. – Том 2. – С. 45–54.

10 Михалев, И. О., Исламов, С. Р. Энерготехнологическое производство на основе частичной газификации углей низкой степени метаморфизма [Text] // И. О. Михалев, С. Р. Исламов: материалы VIII Всероссийской конференции с международным участием «Горение твердого топлива», – 2012. – С. 66–70.

11 Кондратьев, Р. Комплексное повышение энерго-эффективности и экологичности твердотопливной котельной [Text] // Журнал «Материалы IV Международной научной конференции «Строительство и архитектура: теория и практика инновационного развития» (САТРИД-2021 Часть 1). – 2021. № 281. С. 7.

12 Исламов, С. Р. О новой концепции использования угля [Text] // Уголь. – 2007. – № 5. – С. 67–69.

13 Дягилев, Д. В., Шаврин, В. А., Празян, Т. Л. Безотходное использование углей [Text] // Сборник трудов Всероссийской научно-практической конференции «Экология и безопасность в техносфере: Современные проблемы и пути решения» – Томск. – 2017. – С.188–191.

REFERENCES

1 Bogdanov, D., Toktarova, A., Breyer, C. Transition towards 100 % renewable power and heat supply for energy intensive economies and severe continental climate conditions: Case for Kazakhstan. [Text] // Applied Energy. – 2019. – Vol. 254. – 113606 p.

2 Smolka-Danielowska, D., Jabłońska, M., Godziek, S. The Influence of Hard Coal Combustion in Individual Household Furnaces on the Atmosphere Quality in Pszczyna (Poland) [Text] // Minerals. – 2021. – Vol. 11. – 1155 p.

3 Dorian, J. Central Asia: A major emerging energy player in the 21st century. [Text] // Energy Policy. – 2006. – Vol. 34. – 544–555 p.

4 Liu, J., Yang, X., Jiang, X., & Jiang, X. Pyrolysis mechanisms of coal extracts based on TG-FTIR and ReaxFF MD study [Текст] // Fuel Processing Technology. – 2022. – Vol. 226. – 107124 p.

5 Linn, J. Kazakhstan 2050 [Text] // Global Journal of Emerging Market Economies 2050. – 2014. – Vol. 6. – 283–300 p.

6 Mergalimova, A., Ongar, B., Georgiev, A., Kalieva, K., Abitaeva, R., Bissenbayev, P. Parameters of heat treatment of coal to obtain combustible volatile substances. [Text] // Energy. – 2021. – № 224. – 148 p.

7 Ongar, B., Sarsenbaev, E. A., Mergalimova, A. K. Chisty'e ugol'ny'e tehnologii [Clean Coal Technologies] [Text] //, [monograph], Almaty – 2023. – 349 p.

8 Aliyarov, B. K., Mergalimova, A. K. Pat. 2450. Sposob bezmazutnoj rastopki kotloagregatov [Method of non-fuel oil firing of boiler units] [Text] // opubl.30.10.2017. – Byul. № 20.

9 Aliyarov, B., Mergalimova, A., Zhalmagambetova, U. Application of coal thermal treatment technology for oil-free firing of boilers [Text] // Latvian journal of physics and technical sciences. – 2018. – Vol 2. – 45–54 p.

10 Mihalev, I. O., Islamov, S. R. Energotekhnologicheskoe proizvodstvo na osnove chastichnoj gazifikacii uglej nizkoj stepeni metamorfizma [Energy technology production based on partial gasification of low-metamorphic coals] [Text] // I. O. Mihalev, S. R. Islamov: materialy VIII Vserossijskoj konferencii s mezhdunarodnymuchastiem «Gorenie tverdogo topliva». – 2012. – 66–70 p.

11 Kondratev, R. Kompleksnoe povыshenie energoefektivnosti i ekologichnosti tverdotoplivnoj kotel'noj [Comprehensive improvement of energy efficiency and environmental friendliness of a solid fuel boiler house] [Text] // Journal «Material of IV International Scientific Conference «Construction and Architecture: Theory and Practice of Innovative Development» (CATPID-2021 Part 1). – 2021. – Vol. 281. – 7 p.

12 Islamov, S. R. O novoj koncepcii ispol'zovaniya uglya [On the new concept of coal use] [Text] // Ugol' – 2007. – Vol. 5. – 67–69 p.

13 Dyagilev, D. V., Shavrin, V. A., Prazyan, T. L. Bezotkhodnoe ispol'zovanie uglej [Waste-free use of coal] [Text] // Sbornik trudov Vserossijskoj nauchno-prakticheskoy konferencii «Ekologiya i bezopasnost' v tehnosfere: Sovremennyye problemy i puti resheniya» – Tomsk. – 2017. – 188–191 p.

Поступило в редакцию 02.10.25.

Поступило с исправлениями 07.11.25.

Принято в печать 05.12.25.

Н. К. Сейтжаппаров¹, А. К. Мергалимова², А. В. Атякиева³,

*С. Б. Ыбрай⁴, Ж. Т. Бекишева⁵

¹Л. Н. Гумилев атындағы Еуразия ұлттық университеті,

Қазақстан Республикасы, Астана қ.

^{2,3,4,5}С. Сейфуллин атындағы Қазақ агротехникалық зерттеу университеті,

Қазақстан Республикасы, Астана қ.

02.10.25 ж. баспаға түсті.

07.11.25 ж. түзетулерімен түсті.

05.12.25 ж. басып шығаруға қабылданды.

ҚАЗАҚСТАНДЫҚ КӨМІРЛЕРДІҢ ҰТЫМДЫ ПИРОЛИЗ РЕЖИМДЕРІ ЖӘНЕ ОЛАРДЫ АУЫЛДЫҢ ЭЛЕКТР ЖҮЙЕЛЕРІНДЕ ҚОЛДАНУ

Бұл жұмыс жергілікті көмірді ішінара газдандыру (төмен температуралық пиролиз) негізінде шалғай ауылдарды электрмен жабдықтаудың автономды автономды жүйесін құруға арналған. Қазақстан кен орындарының көмірлерін термиялық өңдеу режимдері 300–600 °C диапазонында 5–60 °C/мин қыздыру жылдамдығымен және әртүрлі болшектердің өлшемдерімен тәжірибе жүзінде зерттелді. Ұшқыш заттардың шығымы мен құрамы, сонымен қатар алынған газдың таза қыздыру мәні (Q_n) анықталды. Ұсақ ұнтақтаумен (~0–3 мм) және ~20–30 °C/мин қыздыру жылдамдығымен 500–600 °C ұтымды диапазоны ұша заттардың негізгі үлесін алуды және $Q_n \approx 10–12$ МДж/м³ ($CO \sim 50\%$ және HCH % үлесімен) газ түзілуін қамтамасыз ететіні көрсетілген. тиісінше 10–15 және 5–10 көлем.%, қазандықтарды майсыз іске қосу және газ поршеньді қондырғыларды беру үшін жарамды. Алынған мәліметтер негізінде ауылдың энергетикалық кешенінің технологиялық схемасы әзірленді: пиролиз газы электр энергиясын өндіруге және тұрмыстық пештерге жіберіледі, қатты қалдық (жартылай кокс) ыстық су қазандығында пайдаланылады; қауіпсіздік контурлары (қабылдағыш, клапандар, бақылау) қарастырылған. Жаңалық нақты қазақстандық көмірлердің ұтымды режимінің сандық параметрлерін белгілеуде және газ бен жартылай коксты біртұтас энергетикалық жүйеге практикалық біріктіруді негіздеуде. Бұл көмірді жеке жағумен салыстырғанда жергілікті шығарындыларды азайтуға және автономды жағдайларда жалты пайдалану шығындарын азайтуға әкеледі.

Кілтті сөздер: жартылай газдандыру, көмір пиролизі, жартылай кокс, генератор газы, мазутсыз жағу, қабаттық реактор, автономды энергиямен жабдықтау.

N. K. Seitzhapparov¹, A. K. Mergalimova², A. V. Atyaksheva³,

*S. B. Ybray⁴, Zh. T. Bekisheva⁵

¹L. N. Gumilyov Eurasian National University,
Republic of Kazakhstan, Astana;

^{2,3,4,5}S. Seifullin Kazakh Agrotechnical Research University,
Republic of Kazakhstan, Astana.

Received 02.10.25.

Received in revised form 07.11.25.

Accepted for publication 05.12.25.

RATIONAL PYROLYSIS MODES FOR KAZAKHSTANI COALS AND THEIR APPLICATION IN VILLAGE POWER SYSTEMS

This work is devoted to the creation of an integrated autonomous power supply system for remote villages based on partial gasification (low-temperature pyrolysis) of local coals. Heat treatment modes for coals from Kazakhstani deposits were experimentally studied in the 300–600 °C range at heating rates of 5–60 °C/min and various particle sizes. The yield and composition of volatiles, as well as the net heating value of the resulting gas (Q_n), were determined. It is shown that a rational range of 500–600 °C with fine grinding (~0–3 mm) and a heating rate of ~20–30 °C/min ensures the extr action of the main share of volatiles and the formation of gas with $Q_n \approx 10–12 \text{ MJ/m}^3$ ($\text{CO} \sim 50–60 \text{ vol.}\%$ with H_2 and CH_4 fractions of 10–15 and 5–10 vol.%, respectively), suitable for oil-free starting of boilers and feeding gas piston units. Based on the obtained data, a process flow diagram for a village energy complex was developed: pyrolysis gas is sent to power generation and household stoves, the solid residue (semi-coke) is used in a hot water boiler; safety contours (receiver, valves, monitoring) are provided. The novelty lies in establishing quantitative parameters for a rational regime for specific Kazakh coals and in justifying the practical integration of gas and semi-coke into a single energy system. This results in a reduction in local emissions compared to individual coal combustion and a reduction in total operating costs under autonomous conditions.

Keywords: partial gasification, coal pyrolysis, semi-coke, generator gas, fuel oil-free firing, layer reactor, autonomous power supply.

FTAMP 44.31.35

<https://doi.org/10.48081/ТЕНХ1390>

***Ф. Ж. Тасболат¹, И. А. Султангузин², А. Ш. Алимгазин³,
Ц. Цэрэндорж⁴, К. Б. Сулейменов⁵**

^{1,3}Л. Н. Гумилев атындағы Еуразия ұлттық университеті,
Қазақстан Республикасы, Астана қ.;

^{2,4}«МЭИ» Ұлттық зерттеу университеті, Ресей Федерациясы, Мәскеу қ.;

⁵«Innovation Technology Center» ЖШС,

Қазақстан Республикасы Астана қ.

¹ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-3790-2097>

²ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-6324-5214>

³ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-5848-1842>

⁴ORCID: <https://orcid.org/0009-0009-4827-7221>

⁵ORCID: <https://orcid.org/0009-0005-6283-9164>

*e-mail: tasbolat_gzh@enu.kz

ЖАҢАРТЫЛҒАН ЭНЕРГИЯ КӨЗДЕРІН ПАЙДАЛАНАТЫН, ЖЫЛУ ОҚШАУЛАУЫ БАР ЭНЕРГИЯ БЕЛСЕНДІ ҮЙ

Мақалада пассив үй стандарттарын және жаңартылған энергия көздерін (ЖЭК) интеграциялауды біріктіретін автономды жылумен жабдықтау жүйелері үшін энергия тиімді шешімдері зерттеледі. Ақмола облысы, Зеренді ауылы аумағындағы «Тұмар» оқу-сауықтыру орталығының (ОСО) мысалында кешенді тәсілдер ұсынылған. Бұл тәсілдерге келесі шаралар кіреді: қоршау құрылымдарын жаңғырту (қабырғалар мен шатырды жылу оқшаулау, терезелерді ауыстыру), соның нәтижесінде жылу жоғалту 74 %-ға төмендеген; қуаты 34,5 кВт геотермалдық жылу сорғысы орнатылған, мұнда резервтік орталықтандырылған жылыту жүйесі тек шекті жүктеме кезінде ғана іске қосылады; 136 монокристалды панельден тұратын күн энергетикалық жүйесі, ол фотоэлектрлік жүйелерді модельдеу бағдарламасында жергілікті күн радиациясы мен энергия шығындарын ескере отырып жобаланған. Нәтижесінде жүйе жылына 95 816 кВт сағ электр энергиясын өндіреді және нысанның жалпы энергия тұтынуының 87 %-ын қамтамасыз етеді. PНPP (Passive House Planning Package) және designPH бағдарламаларында

жүргізілген модельдеу жылдық жылу энергиясын тұтынудың $51(\text{kВт} \cdot \text{сағ})/(\text{м}^2 \cdot \text{жыл})$ деңгейіне дейін төмендегенін растайды, бұл нысанды өңірдің климаттық ерекшеліктерін ескере отырып пассив үй стандарттарына ($\leq 15 \text{kВт} \cdot \text{сағ}/(\text{м}^2 \cdot \text{жыл})$) жақындатады. Зерттеу нәтижелері Қазақстанның күрт континенттік климатында ұсынылған шешімдердің тиімділігін дәлелдейді. Мақалада экономикалық шектеулер мен сенімділік талаптарын ескере отырып, шалғай орналасқан өңірлерде автономды жүйелерді жобалауға арналған практикалық алгоритмдер ұсынылады.

Кілтті сөздер: пассивті үй, жаңартылған энергия көздері, жылу сорғысы, PHPP, энергия балансы.

Кіріспе

Энергия адамзат өркениетінің дамуына серпін беретін негізгі факторлардың бірі ретінде әрқашан маңызды рөл атқарып келеді. Бұл құнды ресурстың тапшылығы мен орынсыз ысырап етілуі экономикалық, әлеуметтік және экологиялық тұрғыдан адамзат үшін дағдарысқа алып келуі сөзсіз [1]. Халық санының көбеюі, электр энергиясына деген сұраныстың артуы және жер бетіндегі энергетикалық ресурстар қорының азаюы құрылыс саласында анағұрлым энергия үнемдеуші тәсілдерді әзірлеу қажеттілігін туындатып отыр. Мұндай тәсілдер тұтынылатын ресурстардың көлемін азайтуға, энергияны ұтымды пайдалануға және жаңартылған энергия көздеріне көшуге бағытталған. Осыған байланысты энергия тиімді ғимараттарды жобалау езекті мәселе ретінде қарастырылады.

Қазбалы отынды (газ, көмір, дизель отыны) пайдаланатын дәстүрлі жылыту жүйелері көміртегі негізіндегі ластануға айтарлықтай үлес қосады. Бұл мәселе Қазақстанды да қамтиды, әлім елдерінің арасында 7-орында тұр және жылына 1200 тонна CO_2 эквивалентін шығарады [2].

Бүгінгі таңда Қазақстандағы құрылыс саласы энергия тиімділігі мен үнемділік талаптарына сай келетін заманауи ғимараттарды жобалауға байланысты бірқатар маңызды міндеттермен бетпе-бет келуде. Құрылыс және тұрғын-үй коммуналдық шаруашылығы шамамен электр энергиясының 11%-ын және жылу энергиясының 40 %-дан астамын тұтынады. Осыған байланысты энергия үнемдеу мен энергия тиімділігі мәселелері айрықша өзектілікке ие болады. Қазақстандағы тұрғын үй қоры 290 млн шаршы метрден асады, оның басым бөлігі кеңестік кезеңде салынған көпқабатты ескі үйлерден тұрады және қазіргі заманғы талаптарға сәйкес келмейтін жылу жоғалтумен сипатталады. Зерттеулерге сәкес, Қазақстанда ғимараттардың жылу энергиясын тұтыну деңгейі жылына шамамен м^2 құрайды, бұл көрсеткіш Еуропа елдеріндегі орташа деңгейден (м^2) едәуір жоғары [3].

Жылу энергиясын тұтынуды азайту үшін тұрғын және қоғамдық ғимараттарды салу мен жаңғырту барысында заманауи жылуокшаулағыш материалдарды қолдану арқылы жылу жоғалтуды төмендету қажет. ЖЭК пайдалану ғимараттардың энергия тұтынуын нөлге дейін төмендетуге мүмкіндік береді. Мұндай жағдайда ғимараттар энергиябелсенді сипатқа ие болады.

Қазақстанның жергілікті климаттық жағдайларына бейімделген ғимараттардың энергетикалық көрсеткіштерін жобалау және зерттеу олардың энергия тиімділігін арттыру мақсатында кешенді тәсіл мен оңтайлы шешімдерді іздеуді талап етеді. Бұл үш негізгі бағытты қамтиды [4]:

- ғимарат ішіндегі жайлылықты қамтамасыз ететін микроклиматты ұйымдастыру арқылы тұрғындар мен қызметкерлерге қолайлы жағдай жасау;
- озық технологиялар мен ресурстарды үнемдейтін шешімдерді қолдану арқылы энергия шығындарын барынша азайту;
- ғимараттың үнемділігін қамтамасыз ету және материалдық ресурстарды ұтымды пайдалану.

Ғимараттың пішінін, бағдарлануын және орналасуын дұрыс таңдау, жарық саңылауларын тиімді пайдалану мен ішкі микроклиматты басқару – климаттың ғимараттың жылу балансына теріс әсерін төмендетуге мүмкіндік береді. Энергиябелсенді үйді жобалау барысында сәулеттік және инженерлік шешімдердің өзара байланысын есеру маңызды.

Материалдар мен әдістері

Қазіргі заманғы құрылыс саласында энергия үнемдеуге бағытталған шешімдер белсенді түрде енгізілуде. Бұл бағытта пассивті үй, активті үй және нөлдік энергия тұтынатын ғимарат сияқты тұжырымдамалар ерекше орын алады. Құрылыс саласындағы ең энергия үнемдейтін стандарттардың бірі – 1988 жылы неміс физигі Вольфганг Файст ұсынған пассивті үй тұжырымдамасы болып табылады. Бұл стандарттың негізгі талаптарына мыналар жатады [5;6]:

- жылумен қамтамасыз етуге жұмсалатын меншікті жылу шығыны – м^2 аспауы тиіс;
- құрылымның герметикалығы – қысым айырмашылығы кезінде ауа алмасу коэффициенті болуы қажет;
- бастапқы энергияның жалпы тұтынылуы – дейін;
- жылытуға қажетті ең жоғарғы жүктеме – м^2 аспауы тиіс.

Пассивті үй технологиясы барлық жабық құрылымдардың, яғни, қабырғалардың, терезелер мен шатырлардың жоғары тиімді жылуокшаулауын қамтамасыз етеді. Пассивті кеңістікте жылу оқшаулаудың бірнеше қабаты түзеледі, олар әдетте ішкі және сыртқы қабаттарға бөлінеді. Бұл қабаттар

бір мезгілде үй ішіндегі жылууды сақтап, сыртқы суық ауаның енуіне жол бермейді [7].

Бүгінгі таңда Қазақстанда пассивті үй стандартына толық сәйкес келетін ғимараттар жоқ. Дегенмен, Астана мен Алматы қалаларындағы экономайстер сияқты пилоттық жобалар аясында бұл тұжырымдаманың жекелеген принциптері енгізіле бастады [8]. Ел үшін келешегі зор міндеттердің бірі – нөлдік энергия тұтынуға қол жеткізу мақсатында пассивті және активті үй тәсілдерін біріктіретін интеграцияланған энергиямен қамту жүйелерін әзірлеу болып табылады.

Қазақстан аумағындағы климаттық әртүрлілік (солтүстіктегі күрт континенталды климаттан оңтүстіктегі құрғақ климатқа дейін) жобалау барысында келесі факторларды ескеретін икемді инженерлік шешімдерді талап етеді:

- температураның күрт ауытқуы (қыс мезгілінде -40°C-тан бастап жазда +45°C-қа дейін);
- шапғай ауылдар мен фермерлік шаруашылықтарда орталықтандырылған желілерге қолжетімділіктің шектеулі болуы.

RHPP және designPH пассивті үйді жоспарлау бағдарламалық пакеттері көмегімен моделдеу

Энергоэффективті үйлерді designPH және RHPP бағдарламалық пакеттері көмегімен модельдеу нысанның энергиялық балансын есептеумен ғана шектелмей, сонымен қатар оның геометриялық сипаттамаларын, жылу көпірлерін ескеруге мүмкіндік береді. Бұл – дәл осы құрылыс саласында қолданылатын архитектуралық шешімдердің алуан түрлілігін ескере отырып, аса өзекті болып табылады [9].

Жылдық жеке жылыту энергиясын есептеу үшін қолданылатын өрнек [10]:

$$Q_H = Q_T + Q_V - \eta_{GW} \cdot (Q_S + Q_I) \quad (1)$$

мұндағы:

Q_H – жылу беру жүйесіне қажетті жылдық жылу энергиясы, м²;

Q_T – жылу өткізгіштік арқылы болатын жылу шығындары, м²;

Q_V – желдету арқылы болатын жылу шығындары, м²;

Q_S – күн сәулесі арқылы түсетін, м²

Q_I – ішкі жылу көздерінен түсетін жылу (тұрмыстық техника, адамдар және т.б.), м²

η_{GW} – пайдаланылатын пайдалы жылу коэффициенті.

Бұл бағдарламаның есептеу нәтижелерінің дәлдігі RHPP негізінде жобаланған ғимараттарды көпжылдық зерттеулермен, сондай-ақ пассивті

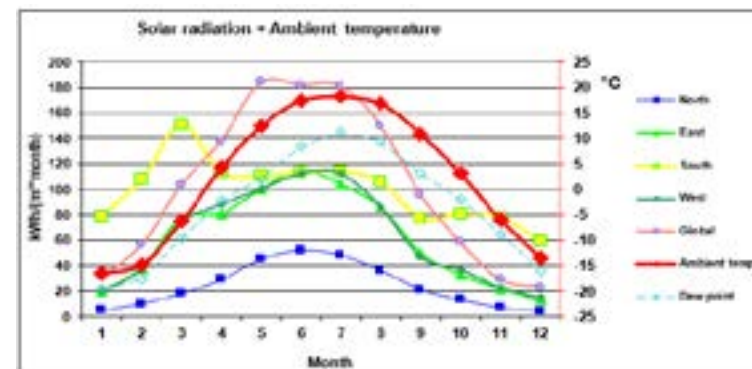
үй стандартына сәйкес салынған сертификатталған нысандарға қатысты кең көлемді деректер базасымен расталады.

Қарастырылып отырған нысан – Л.Н. Гумилев атындағы Еуразия ұлттық университетіне қарасты «Тұмар» оқу-сауықтыру орталығы (сурет-1). Бастапқы мәліметтер: пайдалануға берілген жылы – 1992 жыл, жалпы ауданы – 1993,1 м², үй-жайлар мен бөлмелер саны – 83, орташа тұрғындар саны – 50 адам, орналасқан жері – Ақмола облысы, Зеренді ауданы, Зеренді ауылы.



1-сурет – «Тұмар» ОО

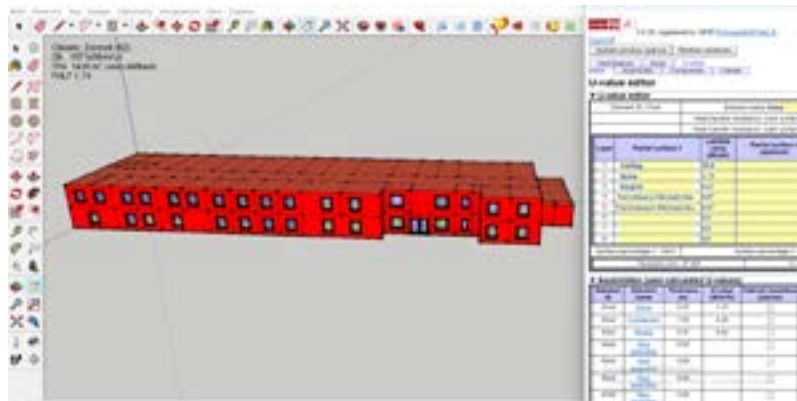
RHPP бағдарламасында келтірілген Зеренді ауылының климаттық деректері (сурет-2) бастапқы актинометриялық және климаттық ақпараттың ең кең таралған дереккөздерінің бірі болып табылатын NASA POWER1 жобасының деректер базасынан алынған [11].



2-сурет – Зеренда елді мекенінің климаттық деректері (RHPP бағдарламасына)

1 <https://power.larc.nasa.gov/data-access-viewer/>

Есептік жүктемелерді анықтау үшін нысанның геометриялық сипаттамаларын және жарықтың түсу бағытына қатысты бағдарлануын ескеретін үшөлшемді математикалық модель designPH бағдарламасының көмегімен құрылды (сурет-3).



3-сурет – designPH бағдарламасындағы үшөлшемді математикалық модель

designPH бағдарламасында әзірленген үшөлшемді математикалық модель нысанның геометриялық параметрлерін, жарықтың түсу төрт бұрышына қатысты бағдарлануын және қоршаушы құрылымдардың бастапқы жылутехникалық сипаттамаларын (кесте-1) ескереді. Модельдеу нәтижелері жылдық энергия тұтынуы мен ең жоғарғы жылу жүктемелерін бағалауды қоса алғанда, жылулық балансты егжей-тегжейлі есептеу үшін RHPP бағдарламасына экспортталады.

1-кесте – Ғимараттың қолданыстағы қоршаушы құрылымдарының жылутехникалық сипаттамалары

Зона	Материал	Қабырға қалыңдығы, δ_{i1}, mm	Жылуөткізгіштік коэффициенті, $\lambda_1, \text{Вт}/(\text{м} \cdot \text{К})$	Жылу беру коэффициенті, $U_{11}, \frac{\text{Вт}}{\text{м}^2 \cdot \text{°C}}$ $R_{\text{сип}} = \frac{\text{м}^2 \cdot \text{°C}}{\text{Вт}}$

Шатыр	Профнастил (металл)	0,5	0,0377	0,622 / 1,6
	Шлак материалдар	200	0,15	
	Темірбетон плита	160	2,04	
	Ішкі сылақ	10	0,87	
Қабырға	Сайдинг (металл)	0,61	50	1,47 / 0,68
	Бетон	200	1,75	
	Кірпіш	25	0,67	
	Сыртқы сылақ	10	0,87	
	Ішкі сылақ	10	0,87	
Іргетас	Бетон	7000	2,0	0,275 / 3,6

Жылу окшаулаусыз күйдегі қоршаушы құрылымдардың барлық жылу өткізуіне қарсы көрсеткіштері ҚР ҚН 2.04-04-2011 «Ғимараттардың жылулық қорғанысы» нормативтік құжатының базалық талаптарына сәйкес келмейді [12]. Осыған байланысты келесі энергия тиімді шешімдерді жүзеге асыру ұсынылады:

- қоршаушы құрылымдарды жылу окшаулау;
- терезелерді ауыстыру;
- жылу насосын пайдалану;
- жаңартылған энергия көздерін (ЖЭК) енгізу.

RHPP бағдарламасындағы бастапқы күйдегі ғимаратты модельдеу нәтижелері жылу энергиясының жылдық тұтынуы m^2 екенін, ал жылулық жүктеме құрайтынын көрсетті (сурет-4).

Specific building demands with reference to the heated floor area				
		Treated floor area: 1431,3 m ²	Requirements	Fulfilled*
Space heating	Heating demand	197 kWh/(m ² ·a)	15 kWh/m ² ·a	no
	Heating load	65 W/m ²	10 W/m ²	no
Space cooling	Overall specific space cooling demand	- kWh/(m ² ·a)	-	-
	Cooling load	- W/m ²	-	-
Primary energy	Heating, cooling, auxiliary energy (HVAC, space heating and auxiliary electricity)	4 kWh/(m ² ·a)	120 kWh/m ² ·a	-
	Specific primary energy reduction through water electricity	- kWh/(m ² ·a)	-	-
	Airtightness	Pressurization test result n ₅₀	0,6 1/h	0,1 1/h

4-сурет –Ғимараттың бастапқы күйі бойынша RHPP бағдарламасындағы моделдеу нәтижелері

Энергия тиімділігін арттыруға бағытталған іс-шаралар Қоршау құрылымдарының жылу окшаулауын жақсарту Ғимараттың қоршаушы қабатының жылу окшаулауы жылытуға қажетті жылу энергиясының көлеміне айтарлықтай әсер етеді. Жылу окшаулағыш

қабаттың сапасы жоғары болып, ол бүкіл ғимаратты саңылаусыз және тығыз түрде қамтуы тиіс.

Ғимараттың жылу оқшаулауы қоршау құрылымдарының жылуөткізгіштік коэффициенттерін есептеу негізінде РНРР [13] бағдарламалық кешені арқылы жобаланады. Энергия тиімділігін оңтайландыру мақсатында жылу шығынын барынша азайтатын тұтас жылу оқшаулағыш қабық қалыптастыру ұсынылады, әрі кейіннен аталған бағдарламада энергия тұтынуын модельдеу жүргізіледі. Қолданылатын материалдар ретінде: шатыр құрылымдарына қалыңдықтағы базальт мақтасы және қабырға панельдеріне қалыңдықтағы жылу оқшаулағыш ұсынылды. Бұл параметрлер климаттық жүктемелер мен жылуөткізбеу талаптары ескеріле отырып таңдалған, нәтижесінде пассивті энергия балансының стандарттарына сәйкестікке қол жеткізу мүмкіндігі қамтамасыз етіледі.

Энергия үнемдеуші терезе жүйелерін енгізу арқылы жарық өткізетін құрылымдардың жылу оқшаулау сипаттамаларын оңтайландыру

Энергия үнемдеудің жаһандық сын-қатерлері жағдайында энергия үнемдеудің маңызды бағыттарының бірі – ғимараттың жалпы энергия шығынының 40 %-на дейтін жететін терезе саңылаулары арқылы жылу шығынын азайту болып табылады [14]. Зерттеліп отырған терезе блоктарының бастапқы параметрлері жылуөткізгіштік коэффициентімен

$U_{\text{ш}} = 2,0 \frac{\text{Вт}}{\text{м}^2 \cdot \text{К}}$ сипатталады, бұл олардың жылу техникалық сипаттамаларын арттыру қажеттілігін көрсетеді.

Зерттеу аясында қолданыстағы терезелерді келесі техникалық сипаттамаларға ие үш камералы әйнектерге ауыстыру ұсынылады:

- инфрақызыл сәулеленуді басуға арналған екі төмен эмиссиялы қабат;
- аралық кеңістіктің қалыңдығы 16 мм, 90% аргон және 10 % ауа қоспасымен толтырылған;

– жылуөткізгіштік коэффициенті : $U_{\text{ә}} = 0,6 \frac{\text{Вт}}{\text{м}^2 \cdot \text{К}}$

– термиялық кедергі $R_{\text{термиялық}} = 1,66 \frac{\text{м}^2 \cdot \text{К}}{\text{Вт}}$;;

– қысқатолқынды радиацияның бақыланатын өтімділігін қамтамасыз ететін күн факторы $g = 45\%$.

Жылу оқшаулау және ауыстыру жұмыстарынан кейін барлық көрсеткіштер қоршаушы құрылымдардың жылуөткізгіштікке қарсылықтың талап етілетін базалық мәніне (ҚР ҚН 2.04-04-2011 «Ғимараттардың жылулық қорғанысы») сәйкес келеді [12].

Қабырғаларды, шатырды жылу оқшаулау және терезелерді ауыстыру жұмыстарынан кейін «Тұмар» ОСО ғимаратының энергия тиімділігі стандарттарына жақындауына қол жеткізілді (2-кесте). Бір шаршы метрге

жылдық энергиясын тұтыну мөлшері $51 \frac{\text{кВт} \cdot \text{сағ}}{(\text{м}^2 \cdot \text{жыл})}$ құрады, ал ғимараттың жылулық жүктемесі – .

2-кесте Жақсартудан кейінгі ғимараттың қоршау құрылымдарының жылу-техникалық сипаттамалары

Зона	Материал	$\delta_i, \text{мм}$ $\lambda_i, \frac{\text{Вт}}{\text{м} \cdot \text{°К}}$			Бір шаршы метрге жылдық энергиясын тұтыну мөлшері,	Ғимараттың жылулық жүктемесі,
		$U_i, \frac{\text{Вт}}{\text{м}^2 \cdot \text{°К}}$	$R_{\text{ғим}}, \frac{\text{м}^2 \cdot \text{°К}}{\text{Вт}}$			
Шатыр	Профнастил (металл)	0,5	0,0377	0,077 / 12,99	51	31
	Шлак материалдар	200	0,15			
	Темірбетон плита	160	2,04			
	Ішкі сылақ	10	0,87			
	Базальт мақтасы	400	0,035			
Қабырға	Сайдинг (металл)	0,61	50	0,134 / 7,46	51	31
	Бетон	200	1,75			
	Кірпіш	25	0,67			
	Сыртқы сылақ	10	0,87			
	Ішкі сылақ	10	0,87			
	Жылу оқшаулағыш материалы	250	0,037			
Іргетас	Бетон	7000	2,0	0,275 / 3,64		

Нәтижелер және талқылау

Жылу сорғысын біріктіру

«Тұмар» ОСО үшін жылу сорғысын біріктіру бойынша ұсынылған шешім – энергия тұтыруды оңтайландырып, ғимараттың энергия үнемділігін арттыруға бағытталған тиімді шара. Қуаты **34,5 кВт** болатын геотермалдық жылу сорғысын орнату – жылыту маусымында төмен потенциалды жылу көзі ретінде жердің энергиясын пайдалану арқылы ғимаратты жылытуға

мүмкіндік береді. Жаз мезгілінде жылу сорғысы салқындату режимінде жұмыс істей отырып, кондиционерлеу жүйесіне қызмет көрсетеді. Энергия үнемдеу шараларынан кейін жылдық жылу жүктемесінің **94 кВт**-тан **31 кВт**-ка дейін төмендеуі – ғимаратта жылу жайлылығын қамтамасыз ету үшін қуатты әрі үнемді жылу сорғысын қолданудың қажеттілігін дәлілдейді.

Резервтік жылу көзі ретінде біз бұрынғы орталықтандырылған жылыту жүйесін сақтап қаламыз, оны жүктеменің шекті кезеңдерінде пайдалануға болады. Бұл жүйенің сенімділігін қамтамасыз етіп, ақаулардың туындау қаупін азайтады.

Геотермалдық жылу сорғысын резервтік орталық жылыту жүйесімен біріктіре отырып енгізу келесі артықшылықтарды береді:

- жылдық энергия тұтыну көлемін азайтады;
- қолайсыз климаттық жағдайларда да жайлы микроклиматты қамтамасыз етеді;
- қайта жаңартылған геометриялық энергияны пайдалану арқылы CO_2 шығындыларын төмендетеді.

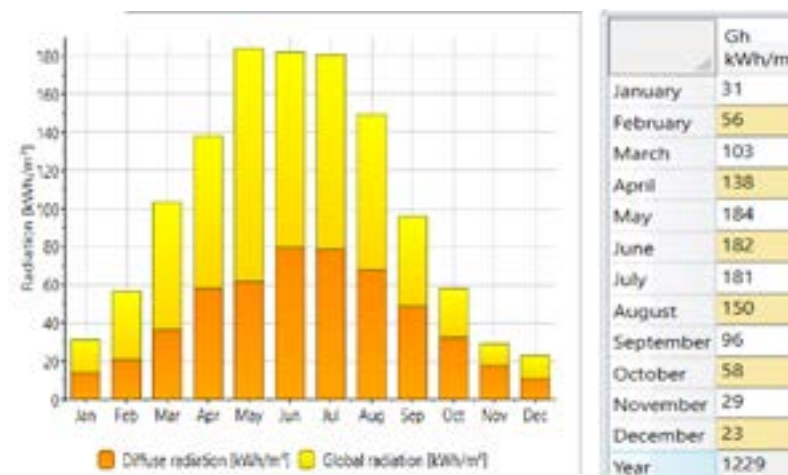
PVsyst бағдарламасын пайдалана отырып, фотоэлектрлік жүйенің жұмыс өнімділігін модельдеу және талдау

PVsyst – фотоэлектрлік жүйелерді жобалауға және модельдеуге арналған бағдарламалық құрал.

Фотоэлектрлік жүйенің құрылымы оның орналасқан жеріне тікелей байланысты, себебі әртүрлі аймақтар күн сәулесінің әрқилы мөлшерін қабылдайды. Бұл айырмашылық белгілі бір орынның күнге қатысты орналасуымен түсіндіріледі. Орналасу ерекшелігі географиялық ендік, бойлық және аймақтың қамту радиусы сияқты бірегей параметрлер жиынтығы арқылы сипатталады [15].

Зеренді – Қазақстанның солтүстігінде орналасқан ауыл, географиялық координаталары $52,90^\circ$ солтүстік ендік пен $69,10^\circ$ шығыс бойлықта, теңіз деңгейінен 437 метр биіктікте орналасқан. Жүйе Л. Н. Гумилев атындағы Еуразия ұлттық университетінің жанындағы «Тұмар» ОСО үшін арналған.

Зеренді ауылы бойынша PVsyst бағдарламасында пайдаланылған күн радиациясы жөніндегі деректер Meteororm климаттық дерекқорынан импортталған [16]. Бұл бағдарламалық модуль көпжылдық метеорологиялық бақылаулар мен спутниктік өлшеулерге негізделген және фотоэлектрлік жүйелерді жобалау үшін аса маңызды болып табылатын күн сәуленуінің параметрлерін жоғары дәлдікпен анықтайды. Зеренді аймағы үшін көлденең бетке түсетін жылдық жиынтық күн радиациясы **1229 кВт·сағ/м²** құрайды. Күн радиациясының айлық ауытқулары сурет-6 көрсетілген.



6-сурет – Күн радиациясының айлық ауытқулары

Аталған жүйе үшін жалпы қуаты болатын екі инвертор және әрқайсысының қуаты болатын 136 монокристалды модуль қажет. Шығыс қуаты барлық қажетті тиімділік түзетулерін ескере отырып есептеледі. Жүйені модельдеу нәтижелері 3-кестеде келтірілген.

3-кесте – PVsyst бағдарламасы арқылы фотоэлектрлік жүйені модельдеу нәтижелері

Параметрлері Айлар	Глобалды көлемдегі радиация,	Көлемдегі диффузиялық радиация,	Қоршаған орта ның температурасы,	Глобалды инциденттік радиация	Тіпті глобалды радиация,	Массивтен шыққан тиімді энергия,	Желіге берілетін энергия,
Қаңтар	32.0	13.04	-16.89	90.2	89.3	6282	5865
Ақпан	56.3	19.87	-15.39	118.3	117.0	8094	7550
Наурыз	110.8	31.85	-6.67	178.3	175.4	11712	10911
Сәуір	138.4	46.07	4.03	171.2	167.6	10745	9970
Май	190.4	65.18	12.49	194.9	190.2	11807	10951
Маусым	187.1	78.54	17.18	177.3	172.5	10611	9828
Шілде	177.0	67.39	18.41	173.7	169.2	10316	9536
Тамыз	151.0	69.05	16.95	167.2	163.4	10066	9337
Қыркүйек	96.0	42.66	10.36	128.8	126.3	7930	7341
Қазан	60.4	30.28	2.71	102.0	100.5	6579	6100
Қараша	30.9	17.27	-6.72	67.3	66.5	4517	4187
Желтоқсан	22.9	11.67	-13.66	66.3	65.6	4559	4240
Жылына	1253.2	492.88	1.99	1635.5	1603.6	103219	95816

Жүйе үшін кіріс деректер ретінде жылдық жалпы глобалды көлденең радиация алынған, оның шамасы **1253 кВт·сағ/м²**. Маусымдық оңтайлы көлбеу бұрыштар негізінде модельдеу нәтижесінде көлбеу жазықтыққа түсетін сәулелену туралы деректер алынған. Нәтижесінде жүктемеге немесе электр желісіне пайдалануға берілетін жүйеден алынған энергия **95816 кВт·сағ** құрайды.

Жүктемеге берілетін шығыс энергиясы бағдарламалық жасақтамадағы шығындарға түзетулер енгізілгеннен кейін есептеледі, бұл сурет-7 көрсетілген.



7-сурет – Жүйедегі энергия шығындарының диаграммасы

Есептік модельге сәйкес, жүйе 136 дана қуаты 500Вт болатын монокристалды күн модулінен және жалпы қуаты 60 кВт болатын екі инвертордан тұрады. Барлық шығындарды ескере отырып, жүйе жылына көлемінде экологиялық таза электр энергиясын өндіреді. Бұл көрсеткіш оқу-сауықтыру орталықтың жылдық жалпы энергия тұтынуының шамамен 87%-ын (яғни, оның ішінде – электрмен жабдықтауға, – жылу сорғысының жұмысына) жабуға мүмкіндік береді. Нысанның энергия балансындағы жаңартылатын энергияның мұндай жоғары үлесі жобаны өңірдің тұрақты даму мақсаттарына сай келетін «жасыл» трансформацияның негізгі элементіне айналдырады.

Жоба шеңберінде өндірілген электр энергиясын күн белсенділігі төмен немесе тұтыну шыңы кезеңдерінде пайдалану мақсатында энергияны аккумуляторлық сақтау жүйелерін енгізу де қарастырылған. Аккумуляторлардың тиімділігі кешеннің жалпы өнімділігі мен сенімділігінде маңызды рөл атқарады.

Сонымен қатар, мұндай жобаларды іске асыру Қазақстан Республикасының жаңартылған энергия көздерін пайдалану саласындағы қолданыстағы заңнамасына толықтай сәйкес келеді. Қазақстан Республикасының «Жаңартылатын энергия көздерін пайдалану мәселелері бойынша қолдануды қамтамасыз ету туралы» Заңына (соңғы өзгерістерді ескере отырып) сәйкес, қуаты 200 кВт-қа дейінгі микрогенерация нысандарын құруға рұқсат етіледі. Аталған заңда шағын ауқымды нысан ретінде жалпы орнатылған қуаты 200 кВт-тан аспайтын жаңартылған энергия көздерін пайдаланатын техникалық құрылғылар түсіндіріледі [17].

Аталған заң сондай-ақ артық өндірілген электр энергиясын сатуға мүмкіндік береді. Бұл өз кезегінде жаңартылған энергия көздерін шағын кәсіпорындар, жеке шаруашылықтар мен білім беру мекемелері деңгейінде енгізу мен коммерцияландыруға ынталандыру тудырады.

Қорытынды

«Тұмар» ОСО энергия тиімділігін арттыру бағытындағы жаңғырту нәтижелері жылу шығындары мен энергия тұтынуды азайтуға кешенді тәсілдің жоғары тиімділігін дәлелдейді. Заманауи жылу оқшаулағыш материалдарды қолдану, қоршаушы құрылымдарды жаңғырту және геотермалдық жылу сорғысын енгізу арқылы жылдық энергия тұтыну деңгейін пассивті үй стандарттарына жуық көрсеткішке – бар болғаны деңгейіне дейін төмендетуге қол жеткізілді. Орнатылған күн панельдері жалпы энергия тұтынудың 87 %-ын жаба алады, ал ғимараттың жылу жүктемесі 67 %-ға төмендеді.

PHPP, designPH және PVsyst бағдарламаларында жүргізілген модельдеу нәтижелері энергия үнемдеу шараларын жаңартылған энергия көздерімен ұштастыру ғимаратты тек энергия тиімді ғана емес, сонымен қатар энергия активті етіп, оның көміртек ізіне түсетін әсерін барынша азайтатынын көрсетті. Бұл тәжірибе Қазақстанның күрт континенттік климаттық жағдайларында да энергия тұтынуы нөлге жуық ғимараттар салуға болатынын дәлелдейді. Мұндай технологияларды өңірдегі әлеуметтік және білім беру мекемелерінде енгізу орынды, себебі олар пайдалану шығындарын едәуір азайтып, заманауи экологиялық стандарттарға сай болуға мүмкіндік береді.

ПАЙДАЛАНЫЛҒАН ДЕРЕКТЕР ТІЗІМІ

1 **Safdar, N., Chaudhry, I. S., Chaudhry, M. O.** Energy Consumption, Environmental degradation and economic growth in developing countries. // Pakistan Journal of Social Sciences. – 2019; 39(2). – P. 615–625 – <http://pjss.bzu.edu.pk/index.php/pjss/article/view/687/620>

2 **Шуленбаева, А. Р., Добровольская, В. В., Тажбенова Ж. О.** Перспективы строительства энергоэффективных зданий в Казахстане // Наука, техника и образование. – 2021; №8 (83). – <https://cyberleninka.ru/article/n/perspektivy-stroitelstva-energoeffektivnyh-zdaniy-v-kazahstane>

3 **Sharipov, R., Kudrevich, O., Yerzhanov, S., Shavdinova, M., Tyulyubayeva, D.** Further improvement of methods for determining energy efficiency of buildings and structures in the republic of Kazakhstan. Journal of Applied Engineering Science. – 2020. – 18(4). – P. 555 – 560. – <http://dx.doi.org/10.5937/jaes0-27202>

4 **Атай, Е. К., Куспанғалиев, Б. У., Самойлов, К. И.** Особенности формирования энергоэффективности в архитектурно-строительном комплексе Казахстана // Проблемы современной науки и образования. 2023. №8(186). – <https://cyberleninka.ru/article/n/osobennosti-formirovaniya-energoeffektivnosti-v-arhitekturno-stroitelnom-komplekse-kazahstana>

5 **Файст, В.** Основные положения по проектированию пассивных домов. – М.: ООО «КОНТИ ПРИНТ», 2015. – 144 с.

6 **Feist, W., Schnieders, J., Dorer, V., Haas, A.** Re-inventing air heating: Convenient and comfortable within the frame of the Passive House concept (2005) Energy and Buildings. – Vol. 37(11). – P. 1186–1203. – <http://dx.doi.org/10.1016/j.enbuild.2005.06.020>

7 **Badescu, V., Rotar, N., Udrea, I.** Considerations concerning the feasibility of the German Passivhaus concept in Southern Hemisphere. Energy Efficiency. 2015; 8(5): P. 919–949. – <http://dx.doi.org/10.1007/s12053-015-9332-8>

8 **Тойшиева, А. А., Тойшиева, А. Д., Муканова, Д. М.** Формирование «зеленой» архитектуры жилых комплексов (на примере Астаны, Сиднея) ВЕСТНИК ЕНУ имени Л. Н. Гумилева. Серия технические науки и технологии №1(142)/2023. – 56 с. – <https://doi.org/10.32523/2616-7263-2023-142-1-56-66>

9 **Султангузин, И. А., Шютц, У., Калякин, И. Д., Говорин, А. В., Яворовский, Ю. В., Жигулина, Е. В., Хромченков, В. Г., Малахов, А., Ланцке, Б., Дамен, А.** Расчет, строительство и обследование фасада энергоэффективного дома // Строительство и реконструкция. – 2017. – №47. – С. 110 – 118. ISSN: 2073-7416

10 Цэрэндорж, Ц., Султангузин, И. А., Махбал, Б., Калякин, И. Д., Яцюк, Т. В. Оценка энергоэффективности здания в Монголии и достижение нулевого энергетического баланса // XXVIII Международная научно-техническая конференция «Гидравлические и теплотехнические системы и агрегаты» Сборник трудов конференции – 2024. – С. 269–277.

11 NASA 2024 Prediction of worldwide energy resource URL <https://power.larc.nasa.gov>

12 СТРОИТЕЛЬНЫЕ НОРМЫ РК, Тепловая защита зданий, СН РК 2.04-04-2011. – Государственные нормативы в области архитектуры, градостроительства и строительства, 2011. – 50 с.

13 Sultanguzin, I., Kalyakin, I., Govorin, A., Khristenko, B., Yavorovsky, Yu. Optimization of the energy efficient active house // 3. INGENIUERTAG 2016. Der Fakultat Maschinenbau, Electro- und Energiesysteme Gus- und Os teuropatag. NESEFF-NETZWERKTREFFEN 2016. Tagungsband. Brandenburgische Technische Universitat. Cottbus Senftenberg. 14–15 November, – 2016. – P. 8–12.

14 Султангузин, И. А., Говорин, А. В., Лукьянов, В. С. Энергоэффективные окна – важнейший элемент для достижения домом нулевого энергопотребления // ЭНЕРГОСБЕРЕЖЕНИЕ №8–2024. – 10 с. ISSN 1609-7505

15 Yadav, P., Kumar, N., Chandel, S. S., Simulation and performance analysis of a 1kWp photovoltaic system using PVsyst, 2015 International Conference on Computation of Power, Energy, Information and Communication (ICCPEIC), Melmaruvathur, India. – 2015. – P. 0358–0363 – <http://dx.doi.org/10.1109/ICCPEIC.2015.7259481>

16 Meteotest A. G. Meteororm: Software for Meteorological Data [Электронный ресурс]. Версия 8.2.0. Берн, Швейцария: Meteotest AG, 2023. URL: <https://meteororm.com>

17 Закон Республики Казахстан от 19 июня 2024 года № 96-VIII ЗРК «О внесении изменений и дополнений в некоторые законодательные акты Республики Казахстан по вопросам поддержки использования возобновляемых источников энергии и электроэнергетики» <https://adilet.zan.kz/rus/docs/Z2400000096>

REFERENCES

1 Safdar, N., Chaudhry, I. S., Chaudhry, M. O. Energy Consumption, Environmental degradation and economic growth in developing countries. Pakistan Journal of Social Sciences, 2019; 39(2), P. 615–625 <http://pjss.bzu.edu.pk/index.php/pjss/article/view/687/620>

2 Shulenbayeva, A. R., Dobrovolskaya, V. V., Tajbenova, Zh. O. Perspektivy stroitelstva energoeffektivnykh zdaniy v Kazakhstane [Prospects for the construction of energy-efficient buildings in Kazakhstan] // Nauka, tekhnika i obrazovanie. – 2021. – №8 (83). – <https://cyberleninka.ru/article/n/perspektivy-stroitelstva-energoeffektivnyh-zdaniy-v-kazakhstane>

3 Sharipov, R., Kudrevich, O., Yerzhanov, S., Shavdinova, M., Tyulyubayeva, D. Further improvement of methods for determining energy efficiency of buildings and structures in the republic of Kazakhstan. Journal of Applied Engineering Science. – 2020. – 18(4). – P. 555–560. – <http://dx.doi.org/10.5937/jaes0-27202>

4 Atay, E. K., Kuspangaliev, B. U., Samoylov, K. I. Osobennosti formirovaniya energoeffektivnosti v arkhitekturno-stroitelnom komplekse Kazakhstana [Features of forming energy efficiency in the architectural and construction complex of Kazakhstan] // Problemy sovremennoy nauki i obrazovaniya, 2023; №8(186). – <https://cyberleninka.ru/article/n/osobennosti-formirovaniya-energoeffektivnosti-v-arhitekturno-stroitelnom-komplekse-kazahstana>

5 Feist, W. Osnovnye polozheniya po proektirovaniyu passivnykh domov [Basic principles for designing passive houses]. Moscow: OOO «KONTI PRINT», 2015. – 144 p.

6 Feist, W., Schnieders, J., Dorer, V., Haas, A. Re-inventing air heating: Convenient and comfortable within the frame of the Passive House concept (2005) Energy and Buildings, Vol. 37(11). – P. 1186-1203. – <http://dx.doi.org/10.1016/j.enbuild.2005.06.020>

7 Badescu, V., Rotar, N., Udrea, I. Considerations concerning the feasibility of the German Passivhaus concept in Southern Hemisphere. Energy Efficiency. 2015; 8(5): – P. 919–949. Available from: – <http://dx.doi.org/10.1007/s12053-015-9332-8>

8 Toyshieva, A. A., Toyshieva, A. D., Mukanova, D. M. Formirovanie «zelenoy» arkhitektury zhilykh kompleksov (na primere Astany, Sidneya) [Formation of «green» architecture of residential complexes (case study: Astana, Sydney)] // Vestnik L. N. Gumilyov ENU. Series: Technical Sciences and Technologies. – №1(142)/2023. – P. 56. – <https://doi.org/10.32523/2616-7263-2023-142-1-56-66>

9 Sultanguzin, I. A., Schütz, U., Kalyakin, I. D., Govorin, A. V., Yavorovsky, Yu. V., Zhigulina, E. V., Khromchenkov, V. G., Malakhov, A., Lanzke, B., Damen, A. Raschet, stroitelstvo i obsledovanie fasada energoeffektivnogo doma [Design, construction and inspection of the facade of an energy-efficient house] // Stroitelstvo i rekonstruitsiya. – 2017; №47. P. 110–118. ISSN: 2073-7416

10 **Tserendorzh, Ts., Sultanguzin, I. A., Makhbal, B., Kalyakin, I. D., Yatsyuk, T. V.** Otsenka energoeffektivnosti zdaniya v Mongolii i dostizhenie nulevogo energeticheskogo balansa [Assessment of building energy efficiency in Mongolia and achieving net-zero energy balance] // XXVIII International Scientific and Technical Conference «Hydraulic and Thermal Systems and Units». Conference Proceedings. – 2024. – P. 269–277.

11 NASA 2024 Prediction of worldwide energy resource URL – <https://power.larc.nasa.gov>

12 Stroitel'nye normy Respubliki Kazakhstan. Teplovaya zashchita zdaniy. SN RK 2.04-04-2011 [Building Codes of the Republic of Kazakhstan. Thermal Protection of Buildings. SN RK 2.04-04-2011]. – Gosudarstvennye normativy v oblasti arkhitektury, gradostroitel'stva i stroitel'stva, 2011. – 50 p.

13 **Sultanguzin, I., Kalyakin, I., Govorin, A., Khristenko, B., Yavorovsky, Yu.** Optimization of the energy efficient active house // 3. INGENIUERTAG 2016. Der Fakultat Maschinenbau, Electro- und Energiesysteme Gus- und Os teuropatag. NESEFF-NETZWERKTREFFEN 2016. Tagungsband. Brandenburgische Technische Universitat. Cottbus Senftenberg. 14–15 November 2016. P. 8–12.

14 **Sultanguzin, I. A., Govorin, A. V., Lukyanov, V. S.** Energoeffektivnyye okna – vazhneishiy element dlya dostizheniya domom nulevogo energopotrebleniya [Energy-efficient windows – a key element for achieving net-zero energy houses] // Energoberezhenie. – №8–2024. – 10 P. ISSN 1609-7505

15 **Yadav, P., Kumar, N., Chandel, S. S.**, Simulation and performance analysis of a 1kWp photovoltaic system using PVsyst, 2015 International Conference on Computation of Power, Energy, Information and Communication (ICCPEIC), Melmaruvathur, India. – 2015. – P. 0358-0363 – <http://dx.doi.org/10.1109/ICCPEIC.2015.7259481>

16 **Meteotest A.G.** Meteotest: Software for Meteorological Data [Electronic resource]. Version 8.2.0. Bern, Switzerland: Meteotest AG, 2023. URL: – <https://meteotest.com>

17 Zakon Respubliki Kazakhstan ot 19 iyunya 2024 goda №96-VIII ZRK «O vnesenii izmeneniy i dopolneniy v nekotorye zakonodatel'nye akty Respubliki Kazakhstan po voprosam podderzhki ispol'zovaniya vozobnovlyaemykh istochnikov energii i elektroenergetiki» [Law of the Republic of Kazakhstan dated June 19. – 2024. – №96-VIII LRK «On Amendments and Additions to Certain Legislative Acts of the Republic of Kazakhstan Regarding the Support of Renewable Energy and the Electric Power Industry»]. – <https://adilet.zan.kz/rus/docs/Z2400000096>

21.08.25 ж. баспаға түсті.

05.11.25 ж. түзетулерімен түсті.

05.12.25. ж. басып шығаруға қабылданды.

*Г. Ж. Тасболат¹, И. А. Султангузин², А. Ш. Алимгазин³,

Ц. Цэрэндорж⁴, К. Б. Сулейменов⁵

^{1,3}Евразийский национальный университет имени Л. Н. Гумилева,

Республика Казахстан, г. Астана.;

^{2,4}Национальный исследовательский университет «МЭИ»,

Российская Федерация, г. Москва.;

⁵ТОО «Innovation Technology Center», Республика Казахстан, г. Астана.

Поступило в редакцию 21.08.25.

Поступило с исправлениями 05.11.25.

Принято в печать 05.12.25.

ЭНЕРГОАКТИВНЫЙ ДОМ С УТЕПЛЕНИЕМ И ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ВИЭ

В статье исследуются энергоэффективные решения для автономных систем теплоснабжения, объединяющие стандарты пассивного дома и интеграцию возобновляемых источников энергии (ВИЭ). На примере учебно-оздоровительного центра «Тумар» (Ақмолинская область, село Зеренды) продемонстрирован комплексный подход, включающий: модернизацию ограждающих конструкций (утепление стен, крыши и замена окон), что снизило теплопотери на 74%; геотермальный тепловой насос с мощностью 34,5 кВт, где резервное центральное отопление активируется только при пиковой нагрузке; солнечную энергосистему из 136 монокристаллических панелей, спроектированную в программе для моделирования фотоэлектрических систем с учётом местной инсоляции и потерь, что обеспечило выработку 95816 кВт·ч/год и покрытие 87% общего энергопотребления объекта.

Моделирование в PHPP (Passive House Planning Package), designPH подтвердило снижение годового потребления тепловой энергии до 51 (кВт·ч)/(м²·год), что приближает объект к стандартам пассивного дома (≤15 кВт·ч/(м²·год)) с учётом климатических особенностей региона. Результаты доказывают эффективность предложенных решений для резко-континентального климата Казахстана. Статья предлагает практические алгоритмы для

проектирования автономных систем в удалённых регионах с учётом экономических ограничений и требований к надёжности.

Ключевые слова: пассивный дом, возобновляемые источники энергии, тепловой насос, PHPP, энергобаланс.

*G. Tasbolat¹, I. Sultanguzin², A. Alimgazin³, Ts. Tserendorj⁴, K. Suleimenov⁵

^{1,3}L. N. Gumilyov Eurasian National University, Republic of Kazakhstan, Astana;

^{2,4}National Research University «MPEI», Russian Federation, Moscow;

⁵LLP «Innovation Technology Center», Republic of Kazakhstan, Astana.

Received 21.08.25.

Received in revised form 05.11.25.

Accepted for publication 05.12.25.

ENERGY-ACTIVE HOUSE WITH INSULATION AND USE OF RENEWABLE ENERGY SOURCES

The article explores energy-efficient solutions for autonomous heating systems that combine passive house standards with the integration of renewable energy sources (RES). Using the example of the educational and wellness center «Tumar» (Akmola Region, Zerenda Village), a comprehensive approach is demonstrated, which includes: the modernization of building envelopes (insulation of walls and roof, and window replacement), resulting in a 74 % reduction in heat loss; a geothermal heat pump with a capacity of 34.5 kWh, where the backup central heating system is activated only during peak loads; and a solar power system consisting of 136 monocrystalline panels, designed using photovoltaic simulation software that takes into account local insolation and losses. This system generates 95,816 kWh per year, covering 87 % of the facility's total energy consumption.

Modeling in PHPP (Passive House Planning Package) and designPH confirmed a reduction in annual thermal energy consumption to 51 kWh/(m² year), bringing the facility closer to passive house standards (≤15 kWh/(m² year)) while accounting for the region's climatic conditions. The results demonstrate the effectiveness of the proposed solutions for Kazakhstan's sharply continental climate. The article offers practical algorithms for designing autonomous systems in remote regions, taking into account economic constraints and reliability requirements.

Keywords: passive house, renewable energy sources, heat pump, PHPP, energy balance.

FTAMP 27.25.21

<https://doi.org/10.48081/VWMQ7492>

**Е. Таштай¹, Ә. М. Сәбиболда², Е. Нусупов³,
Д. А. Наубетов⁴, *Н. Қ. Смайлов⁵**

^{1,2,3,4,5}Satbayev University, Қазақстан Республикасы, Алматы қ.;

^{2,5}Академик Ә. А. Жолдасбеков атындағы механика және машинатану институты, Қазақстан Республикасы, Алматы қ.;

⁴Ғ. Дәукеев атындағы Алматы энергетика және байланыс университеті, Қазақстан Республикасы, Алматы қ.

¹ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-0809-537X>

²ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-1186-7940>

³ORCID: <https://orcid.org/0009-0008-5118-3683>

⁴ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-0323-0675>

⁵ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-7264-2390>

*e-mail: n.smailov@satbayev.university

ВОЛОКОНДЫ-ОПТИКАЛЫҚ ГИРОСКОПТАРДЫҢ СИПАТТАМАЛАРЫН ЗЕРТТЕУ ЖӘНЕ НАВИГАЦИЯЛЫҚ ЖҮЙЕЛЕРДЕГІ ТИІМДІЛІГІН АРТТЫРУ

Бұл мақалада волоконды-оптикалық гироскоптардың (ВОГ) навигациялық жүйелердегі дәлдігін, сезімталдығын және ұзақмерзімді тұрақтылығын арттыруға бағытталған кешенді тәсілдер қарастырылған. Зерттеу жұмысының өзектілігі инерциялық навигация саласында жоғары дәлдікке жету және спутниктік сигнал болмаған жағдайда жүйенің автономды жұмысын қамтамасыз ету қажеттілігімен анықталады. MATLAB/Simulink ортасында Саньяк эффектісіне негізделген ВОГ-тың физикалық және сигналдық моделі әзірленді. Модель құрамында жарық көзі, талшық катушқасы, фазалық модулятор және фотодетектор сияқты негізгі оптикалық элементтер қамтылды. Сигналды өңдеу кезеңінде жабық контурлы демодуляция, квадратуралық қателікті компенсациялау және температуралық дрейфті азайту алгоритмдері жүзеге асырылды. Алпау ауытқуы әдісі арқылы гироскоп қателіктері статистикалық тұрғыдан талданды және бұрыштық кездейсоқ жүріс (ARW), нөлдік ығысу тұрақсыздығы (Bias Instability) мен масштаб коэффициентінің

сызықтық еместігі үшін стохастикалық модельдер енгізілді. Интеграцияланған INS/GNSS архитектурасы кеңейтілген Калман сүзгісі арқылы іске асырылып, «урбан-каньон» және спутниктік сигналдың уақытша жоғалу сценарийлерінде тексерілді. Алынған нәтижелер ВОГ құрылғыларының бұрыштық жылдамдыққа жоғары сезімталдық танытатынын, шу тығыздығының азайғанын және bias тұрақтылығының жақсарғанын көрсетті. Сонымен қатар, GNSS сигналы шектеулі жағдайда да инерциялық шешімнің тұрақтылығы сақталып, позициялық және курстық қателік айтарлықтай төмендеді. Ұсынылған модельдеу әдістемесі волоконды-оптикалық гироскоптарға негізделген жоғары дәлдікті инерциялық-навигациялық кешендерді жобалау, калибрлеу және оңтайландыру үшін ғылыми әрі қолданбалық тұрғыдан маңызды құрал болып табылады.

Кілтті сөздер: волоконды-оптикалық гироскоп, Sagnac эффекті, Allan ауытқуы, ARW, bias, Калман сүзгісі, INS/GNSS.

Кіріспе

Қазіргі заманғы навигациялық жүйелер жоғары дәлдік пен сенімділікті талап етеді, әсіресе спутниктік сигналдар қолжетімсіз жағдайларда автономды жұмыс істеу қабілеті маңызды. Мұндай міндеттерді шешуде Саньяк эффектісіне негізделген волоконды-оптикалық гироскоптар (ВОГ) ерекше рөл атқарады [1, 18–22-бб]. Олар қозғалмалы бөлшектердің болмауы, жоғары сезімталдық пен ұзақмерзімді тұрақтылығымен дәстүрлі механикалық гироскоптарға қарағанда артықшылыққа ие.

Дегенмен, ВОГ дамуына қарамастан, олардың қолданылуында шу мен дрейф, температуралық тұрақсыздық және интерференциялық сигналды өңдеудің күрделілігі сияқты шектеулер сақталуда [2, 14–17-бб.]; [3, 39-б.]. Бұл кемшіліктерді азайту үшін сандық демодуляция, қателіктерді компенсациялау және стохастикалық модельдеу әдістері зерттелуде.

Соңғы жылдары ВОГ пен ғаламдық навигациялық спутниктік жүйелерді (GNSS) интеграциялау ерекше назарға алынуда. Бұл тәсіл инерциялық өлшеулердің жеделдігі мен автономдылығын GNSS-тің ғаламдық қамтылуымен үйлестіреді [4, 11-б.]. Мұндай жағдайда фильтрация алгоритмдері арқылы гироскоптық қателіктерді өтеу және спутниктік сигнал әлсірегенде жүйенің тұрақтылығын сақтау мүмкіндігі артады.

Осыған байланысты бұл жұмыстың мақсаты – MATLAB/Simulink ортасында ВОГ моделін құру, қателік көздерін талдау және GNSS жүйесімен интеграция тиімділігін бағалау болып табылады. Алынған нәтижелер жоғары дәлдікті навигациялық кешендерді дамытуға негіз бола алады.

Материалдар мен әдістері

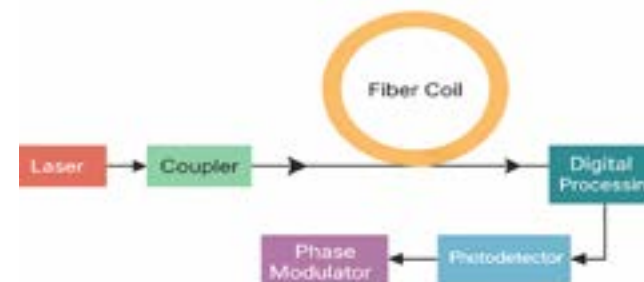
Бұл зерттеу жұмысының негізінде волоконды-оптикалық гироскоптардың (ВОГ) сипаттамаларын модельдеу және оларды навигациялық жүйелерде қолдану тиімділігін бағалау мақсаты қойылды. ВОГ жұмысының физикалық принципі Саньяк эффектісіне негізделген, яғни жарық ағыны екі бағытта талшық катушқасы арқылы таратылған кезде бұрыштық жылдамдық әсерінен интерференциялық фаза ығысуы пайда болады [5, 34–48-бб.]. Бұл құбылыс келесі өрнекпен сипатталады:

$$\Delta\varphi = \frac{8\pi A}{\lambda c} \cdot \Omega \quad (1)$$

мұнда A – катушканың ауданы, λ – сәулелің толқын ұзындығы, c – жарық жылдамдығы, ал Ω – бұрыштық жылдамдық. Фаза ығысуы фотодетекторда тіркелетін интерференциялық сигналдың өзгерісіне әкеледі, ал оның амплитудасы келесі теңдеумен өрнектеледі [6, 29-б.]:

$$I(\Omega) = I_0 [1 + \cos(\Delta\varphi)] \quad (2)$$

Модельдеу MATLAB/Simulink ортасында жүзеге асырылды, онда лазер көзі, бағыттаушы қосқыш, талшық катушқасы, фазалық модулятор және фотодетектордан тұратын толық блок-схема құрастырылды. 1-суретте гироскоптың негізгі физикалық элементтері көрсетілген. Ол схема тек құрылымды сипаттап қана қоймай, сонымен қатар сигналды сандық демодуляциялау, квадратуралық қателікті компенсациялау және жабық контурлы басқару алгоритмдерін іске асыруға мүмкіндік береді.



1-сурет – Волоконды-оптикалық гироскоптың құрылымдық сызбасы

Лазер көзі шығаратын сәуле оптикалық қосқыш арқылы екі бағытқа бөлініп, талшық катушқасы арқылы таралады. Саньяк эффектісі нәтижесінде пайда болған фазалық ығысу фотодетекторда тіркеледі, ал сигнал сандық өңдеу блогына жіберіліп, демодуляция және қателіктерді компенсациялау алгоритмдері орындалады [7, 21–28-бб.]; [8, 9-б.]. Фазалық модулятор интерференциялық сигналды басқаруды қамтамасыз етеді.

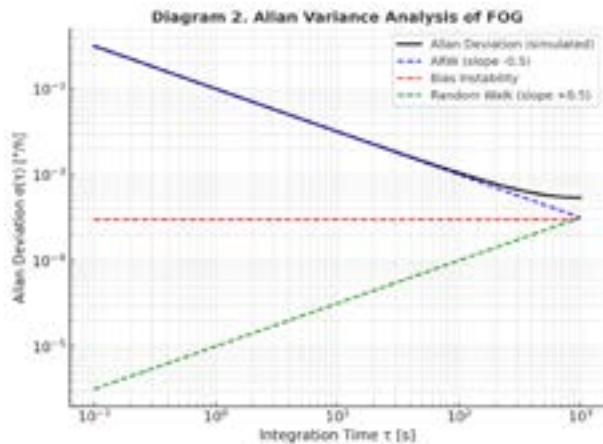
Зерттеу барысында қателіктердің негізгі көздері ескерілді, олардың ішінде бұрыштық кездейсоқ жүріс (Angle Random Walk, ARW), нөлдік ығысу тұрақсыздығы (Bias Instability, BI), масштаб коэффициентінің сызықтық еместігі және температуралық дрейфтер бар. ARW мәні уақытқа тәуелділігін сипаттайтын классикалық өрнекпен бағаланды [9, 3-4 бб.]; [10, 57-б.]:

$$\sigma_{ARW} = \frac{K}{\sqrt{\tau}} \quad (3)$$

ал нөлдік ығысу дрейфі бірінші ретті Гаусс–Марков процесімен модельденді:

$$b_{k+1} = \phi b_k + w_k \quad (4)$$

мұнда ϕ – корреляция коэффициенті, w_k – ақ шу. Allan variance әдісі қолданылып, ұзақмерзімді тұрақсыздық пен кездейсоқ шудың үлесі жеке-жеке 2-суретте талданды.



2-сурет – Волоконды-оптикалық гироскоп қателіктерін Allan variance әдісімен талдау

ВОГ моделінің нәтижелері инерциялық-навигациялық жүйе құрамында қарастырылды. Интеграция GNSS өлшемдерімен біріктіріліп, кеңейтілген Калман сүзгісі арқылы жүзеге асырылды. Бұл жағдайда күй векторы позиция, жылдамдық, ориентация және гироскоп ығысуынан тұрды:

$$x = [p \ v \ \theta \ b_g]^T \quad (5)$$

3-суретте көрсетілген INS/GNSS интеграциясының құрылымдық сызбасында гироскоптан алынған бұрыштық жылдамдықтар навигациялық теңдеулер арқылы өңделіп, Калман сүзгісі арқылы спутниктік түзетулер енгізілді. Мұндай тәсіл GNSS сигналы әлсіреген немесе уақытша жоғалған жағдайда да навигацияның тұрақтылығын сақтауға мүмкіндік берді [11, 32-б.].



3-сурет – INS/GNSS интеграциясының құрылымдық сызбасы

Сызбада волоконды-оптикалық гироскоптан алынған бұрыштық жылдамдықтар инерциялық навигациялық жүйе теңдеулерінде өңделіп, алдын ала навигациялық шешім қалыптастырылады. GNSS өлшемдері кеңейтілген Калман сүзгісі арқылы INS нәтижелерімен біріктіріледі. Бұл тәсіл навигациялық шешімнің дәлдігін арттырып, спутниктік сигнал әлсіреген жағдайда да жүйенің тұрақтылығын қамтамасыз етеді.

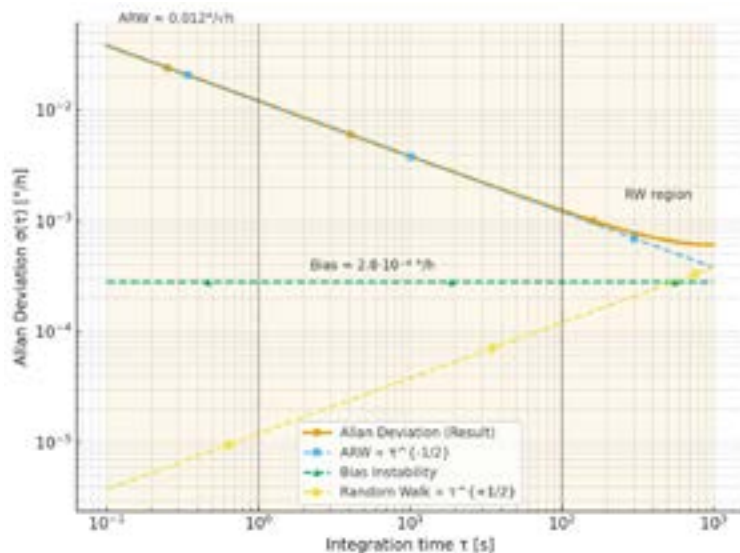
Бағалау критерийлері ретінде гироскоптық сенсордың ARW және bias stability көрсеткіштері, сондай-ақ позициялық дәлдік (CEP), курстық қателік және спутниктік сигнал шектелген кездегі дрейф динамикасы қолданылды. Жүргізілген модельдеу нәтижелері алынған әдістердің ВОГ сенімділігін арттырып қана қоймай, интеграцияланған жүйелердің практикалық жағдайларда жоғары дәлдікті қамтамасыз ете алатынын көрсетті.

Нәтижелер және талқылау

Модельдеу нәтижелері волоконды-оптикалық гироскоптың бұрыштық жылдамдыққа жоғары сезімталдығын айқын көрсетті. Сандық демодуляциядан кейін интерференциялық сигналдың амплитудасы бұрыштық жылдамдықтың

өзгеруіне сызықты тәуелділікпен сипатталды. Бұл нәтиже модельдің физикалық процестерді дұрыс бейнелейтінін растады және ВОГ жұмысының негізгі принципі тәжірибелік жағдайда қолдануға болатынын көрсетті.

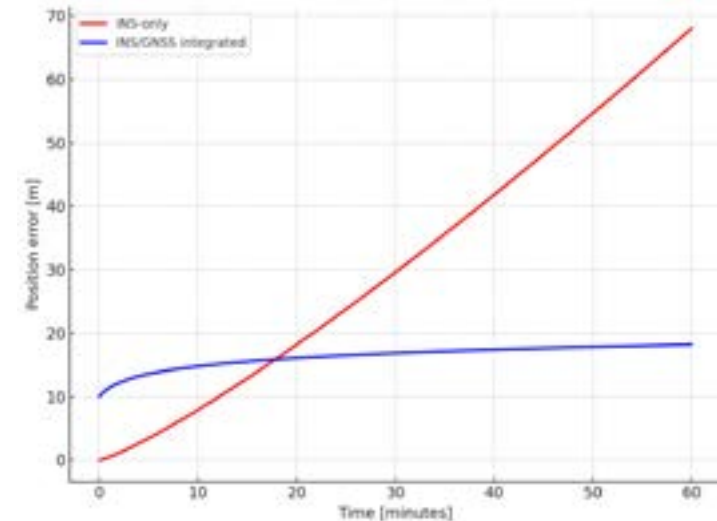
ВОГ қателіктерін сипаттау үшін Allan variance әдісі қолданылды. 4-суретте көрсетілген нәтижелер уақыт аралығына байланысты қателік сипаттамаларының үш аймағын айқын көрсетті. Қысқа интервалда бұрыштық кездейсоқ жүріс (ARW) басым болып, оның әсері фотондық шудың және электрондық күшейткіштің шумымен байланысты екені байқалды. Орташа интервалда плато түрінде байқалатын нөлдік ығысу тұрақсыздығы (Bias Instability) гироскоп элементтеріндегі ұзақмерзімді дрейфтерге сәйкес келеді. Ал үлкен интервалдарда кездейсоқ дрейфтің (Random Walk) әсері артып, оның себебі температуралық өзгерістер мен оптикалық компоненттердің ұзақмерзімді тұрақсыздығына байланысты екені анықталды. Алынған шамалар – $ARW \approx 0.01^\circ/\sqrt{h}$ және $Bias Instability \approx 3 \cdot 10^{-4}^\circ/\sqrt{h}$ – модельдің жоғары дәлдікті навигациялық деңгейге сәйкес келетінін дәлелдейді.



4-сурет – ВОГ қателіктерінің Allan variance нәтижелері

Гироскоп INS құрамында жеке пайдаланылған кезде позициялық және курстық қателіктердің уақыт өте тез жиналатыны анықталды. Бұл құбылыс қателіктің уақытқа тәуелді шамамен степендік заңдылықпен ($t^{1.2}$) өсуінен көрінді. Ал INS/GNSS интеграциясы кезінде қателік динамикасы түбегейлі

өзгерді: 5-суретте көрсетілгендей, позициялық қате логарифмдік сипатта баяу өсіп, ондаған метр деңгейінде шектелді. Бұл кеңейтілген Калман сүзгісінің (EKF) тиімділігін растайды, себебі ол GNSS сигналдары әлсіреген жағдайда да INS өлшемдерін түзетіп, жүйенің тұрақтылығын қамтамасыз етті.



5-сурет – INS-only және INS/GNSS позициялық қателіктерінің салыстырмасы

Жалпы талдау көрсеткендей, волоконды-оптикалық гироскоптың қателік сипаттамалары дұрыс бағаланып, олардың GNSS өлшемдерімен интеграциясы навигациялық шешімнің дәлдігі мен сенімділігін айтарлықтай арттырады. Бұл тәсіл спутниктік сигнал толық жоғалған жағдайда да жүйенің жұмыс қабілеттілігін сақтауға мүмкіндік береді.

Қаржыландыру туралы ақпарат

Зерттеу жұмысы Қазақстан Республикасы Ғылым және жоғары білім министрлігінің гранттық қаржыландыруы аясында, AP26104843 «Волоконды-оптикалық гироскоптарды зерттеу және навигациялық жүйені дамыту үшін қолдану» атты ғылыми жоба шеңберінде орындалды.

Қорытынды

Бұл зерттеу волоконды-оптикалық гироскоптардың модельдік сипаттамаларын айқындап, олардың навигациялық жүйелердегі қолдану тиімділігін дәлелдеді. Модельдеу нәтижелері Саньяк эффектсіне негізделген физикалық процестердің дұрыс сипатталғанын және сандық демодуляция

алгоритмдерінің бұрыштық жылдамдықты сенімді түрде бағалай алатынын көрсетті.

Қателік сипаттамаларын талдау гироскоптың бұрыштық кездейсоқ жүріс пен нөлдік ығысу тұрақсыздығы жағынан жоғары дәлдікті навигациялық деңгейге сәйкес келетінін растады. Бұл ВОГ-ты заманауи инерциялық навигациялық жүйелерде қолдану үшін жеткілікті сенімді құрал ретінде қарастыруға мүмкіндік береді.

INS/GNSS интеграциясы тәжірибелік тұрғыдан тиімді екенін дәлелдеді: спутниктік сигнал әлсіреген немесе уақытша жоғалған жағдайда да жүйе тұрақтылығын сақтап, позициялық дәлдікті қамтамасыз етті. Зерттеу нәтижелері волоконды-оптикалық гироскоптардың навигациялық жүйелерде кеңінен қолданылу әлеуетін ашып көрсетеді. Алдағы уақытта температуралық дрейфті модельдеу, тәжірибелік прототиптерді сынау және алгоритмдерді нақты уақыт режимінде тексеру зерттеуді одан әрі жетілдіруге бағытталуы мүмкін.

ПАЙДАЛАНЫЛҒАН ДЕРЕКТЕР ТІЗІМІ

1 **Allan, D.W.** Statistics of atomic frequency standards // Proceedings of the IEEE. – 1966. – 54(2). – P. 221–230. – <https://doi.org/10.1109/PROC.1966.4634>

2 **El-Sheimy, N., Hou, H., Niu, X.** Analysis and modeling of inertial sensors using Allan variance // IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement. – 2008. – 57(1). – P. 140–149. – <https://doi.org/10.1109/TIM.2007.908635>

3 **Niu, X., Zhang, Q., Li, Y., Zhang, H.** Using Allan variance to analyze the error characteristics of GNSS positioning // GPS Solutions. – 2014. – 18 (2). – P. 231–242. – <https://doi.org/10.1007/s10291-013-0324-x>

4 **Lefèvre, H. C.** The fiber-optic gyroscope, a century after Sagnac's experiment: a review // Optical Fiber Technology. – 2013. – 19(6). – P. 828–832. – <https://doi.org/10.1016/j.yofte.2013.08.007>

5 **Lefèvre, H. C.** The fiber-optic gyroscope: Challenges to become the ultimate rotation-sensing device // Comptes Rendus Physique. – 2014. 15(10). – P. 851–858. – <https://doi.org/10.1016/j.crhy.2014.10.007>

6 **Shupe, D. M.** Fiber-optic gyroscope with additional fiber in optical path // Applied Optics. – 1980. – 19(5). – P. 654–655. – <https://doi.org/10.1364/AO.19.000654>

7 **Shupe, D. M.** Thermal effects in interferometric fiber-optic gyroscopes // Applied Optics. – 1981. – 20(2). – P. 286–289. – <https://doi.org/10.1364/AO.20.000286>

8 **Wang, W., Chen, X.** Multiscale EEMD-based modeling of FOG temperature drift // Applied Optics. – 2018. – 57 (28). – P. 8443–8450. – <https://doi.org/10.1364/AO.57.008443>

9 **Wang, W., Chen, X.** Compensation of FOG temperature drift using PSO-SVM algorithm // Applied Optics. – 2016. – 55(23). – P. 6243–6250. – <https://doi.org/10.1364/AO.55.006243>

10 **Zhao, S., Liu, Q., Liu, Y., Ma, H., He, Z.** Navigation-grade resonant fiber-optic gyroscope based on white-light interferometry // Photonics Research. – 2022. – 10(2). – P. 542–549. – <https://doi.org/10.1364/PRJ.443496>

11 **Kim, H. K., Digonnet, M. J.F., Kino, G. S.** Room-temperature operation of an air-core photonic-bandgap fiber optic gyroscope // Journal of Lightwave Technology. – 2006. – 24(8). – P. 3169–3174 – <https://doi.org/10.1109/JLT.2006.880689>

24.09.25 ж. баспаға түсті.

21.10.25 ж. түзетулерімен түсті.

05.12.25 ж. басып шығаруға қабылданды.

*Е. Таумай¹, А. М. Сабиболда², Е. Нусунов³, Д. А. Наубетов⁴, *Н. К. Смайлов⁵*

^{1,2,3,4,5}Satbayev University, Республика Казахстан, г. Алматы;

^{2,5}Институт механики и машиноведения

имени академика У. А. Джолдасбекова, Республика Казахстан, г. Алматы;

⁴Алматинский университет энергетики и связи имени Г. Даукеева,

Республика Казахстан, г. Алматы.

Поступило в редакцию 24.09.25.

Поступило с исправлениями 21.10.25.

Принято в печать 05.12.25.

ИССЛЕДОВАНИЕ ХАРАКТЕРИСТИК ВОЛОКОННО-ОПТИЧЕСКИХ ГИРОСКОПОВ И ПОВЫШЕНИЕ ИХ ЭФФЕКТИВНОСТИ В НАВИГАЦИОННЫХ СИСТЕМАХ

В данной статье представлен комплекс методов, направленных на повышение точности, чувствительности и долгосрочной стабильности волоконно-оптических гироскопов (ВОГ) в навигационных системах. Актуальность исследования обусловлена необходимостью обеспечения высокой точности инерциальной навигации и автономной работы систем при отсутствии спутниковых сигналов. В программной среде MATLAB/Simulink разработана физическая и сигнальная модель ВОГ, основанная на эффекте Сагнака. Модель включает

основные оптические компоненты: источник излучения, катушку волоконного кабеля, фазовый модулятор и фотодетектор. На этапе обработки сигналов реализованы алгоритмы замкнутой демодуляции, компенсации квадратурной ошибки и температурного дрейфа. Для анализа ошибок гироскопа использован метод дисперсии Аллана, на основе которого построены стохастические модели углового случайного блуждания (ARW), нестабильности нулевого смещения (Bias Instability) и нелинейности коэффициента масштаба. Интегрированная архитектура INS/GNSS реализована с применением расширенного фильтра Калмана и протестирована в сценариях «городского каньона» и временной потери сигнала. Результаты моделирования показали высокую чувствительность ВОГ к угловой скорости, снижение плотности шума и улучшение стабильности смещения, что обеспечило повышение точности определения курса и координат. Кроме того, даже при ограниченном доступе к GNSS система сохраняла устойчивость инерциального решения и низкий уровень накопления ошибок. Разработанная методика моделирования и интеграции может быть использована для проектирования, калибровки и оптимизации высокоточных инерциально-навигационных комплексов на основе волоконно-оптических гироскопов, обеспечивая практическую основу для дальнейших исследований и совершенствования таких систем.

Ключевые слова: волоконно-оптический гироскоп, эффект Сазнака, дисперсия Аллана, ARW, bias, фильтр Калмана, INS/GNSS.

*Y. Tashtay¹, A. M. Sabibolda², Y. Nussupov³, D. A. Naubetov⁴, *N. K. Smailov⁵*

^{1,2,3,4,5}Satbayev University, Republic of Kazakhstan, Almaty;

^{2,5}Institute of Mechanics and Engineering named after Academician

U.A. Zholdasbekov, Republic of Kazakhstan, Almaty;

⁴Gumarbek Daukeev Energo University,

Republic of Kazakhstan, Almaty.

Received 24.09.25.

Received in revised form 21.10.25.

Accepted for publication 05.12.25.

INVESTIGATION OF FIBER-OPTIC GYROSCOPE CHARACTERISTICS AND ENHANCEMENT OF THEIR EFFICIENCY IN NAVIGATION SYSTEMS

This paper presents a comprehensive set of methods aimed at improving the accuracy, sensitivity, and long-term stability of fiber-optic gyroscopes (FOGs) in modern navigation systems. The relevance of the study lies in the need to achieve high-precision inertial navigation and ensure autonomous system operation in the absence of satellite signals. A physical and signal model of the FOG based on the Sagnac effect was developed in the MATLAB/Simulink environment. The model incorporates key optical components, including a light source, fiber coil, phase modulator, and photodetector. At the signal processing stage, algorithms for closed-loop demodulation, quadrature error compensation, and temperature drift correction were implemented. The Allan variance method was used to statistically analyze the FOG error sources, and stochastic models were introduced for angular random walk (ARW), bias instability, and scale factor nonlinearity. An integrated INS/GNSS architecture was implemented using an extended Kalman filter and tested under “urban canyon” and temporary GNSS signal loss scenarios. The results demonstrated high sensitivity of the FOG to angular velocity, reduced noise density, and improved bias stability, leading to significantly enhanced heading and position accuracy. Furthermore, the system maintained the stability of the inertial solution even under limited GNSS availability, ensuring low error accumulation over time. The proposed modeling and integration methodology can be effectively applied to the design, calibration, and optimization of high-precision inertial navigation systems based on FOG technology, providing both theoretical and practical value for future research and the development of robust navigation solutions.

Keywords: fiber-optic gyroscope, Sagnac effect, Allan variance, ARW, bias, Kalman filter, INS/GNSS.

<https://doi.org/10.48081/CXKZ8549>

***М. М. Умышева¹, Е. А. Сарсенбаев², Д. Р. Умышев³**

^{1,2,3}Казахский национальный исследовательский технический университет имени К. И. Сатпаева, Республика Казахстан, г. Алматы.

¹ORCID: <https://orcid.org/0009-0009-4748-611X>

²ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-8887-1171>

³ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-6834-1635>

*e-mail: m.umysheva@satbayev.university

АНАЛИЗ ПУСКОВЫХ ОПЕРАЦИЙ ПАРОГАЗОВЫХ УСТАНОВОК

В данной статье проведен анализ пусковых операций парогазовых установок. Обобщены результаты, полученные различными авторами по моделированию и реальным данным по пускам. Освещены основные проблемы, возникающие при пусковых операциях. Показано, что пусковые операции является затратными с точки зрения энергетических показателей, а также с точки зрения механической надежности энергетического оборудования. В статье делается акцент на технологиях моделирования энергетического оборудования в виду достаточно большой сложности проведения подобных исследований на реальных объектах.

В целом анализ показал, что пуск парогазовых установок связан со значительным количеством показателей. В частности, температур газов после камеры сгорания, уходящих газов. Показано, что наиболее долгая часть процедуры пуска относится к паросиловой части в виду необходимости соблюдения требований по механической надежности элементов паросиловой части.

В результате анализа было показано, что существует большой потенциал по снижению времени пуска за счет котла утилизатора. В частности применение технологии дожигания газов в котле утилизатора в значительной степени снижает время для набора необходимых параметров свежего пара перед паровой турбиной. В частности показано, что с применение дожигания время набора номинальных параметров может сокращаться на 31 % при неостывшем пуске парогазовой установки.

Ключевые слова: Парогазовая установка, моделирование, время, анализ, пуск.

Введение

На настоящий момент все более актуальными становятся вопросы не только наличия больших мощностей, а времени их подключения к сети и их влияние на сеть. Особую актуальность это приобретает в связи с увеличением доли ВИЭ [1]. Увеличение доли ВИЭ в сетях приводят к нестабильности выработки и потребления энергии, что в свою очередь вносит некоторые требования для базовых и пиковых мощностей.

Особый интерес вызывают парогазовые установки, планируемые в Казахстане. В частности, в Республике планируется строительство ПГУ мощностью 1000 МВт в Туркестанской области [2]. Согласно открытым источникам сейчас ведутся работы по реконструкции ТЭЦ-3 в г. Алматы на базе ПГУ с увеличением мощности станции до 450 МВт [3]. Планируется строительству ПГУ на территории Алматинский ТЭЦ-1 [4]. Более того ПГУ планируется построить в Шымкенте и Астане, а также в других городах страны [5].

Электростанции комбинированного цикла (ПГУ) представляют собой сочетание газовой турбины и паротурбинного генератора для производства электроэнергии. В такой системе газотурбинный генератор вырабатывает электрическую энергию, а тепло отработанных газов используется для получения пара, который затем приводит в действие паровую турбину для дополнительной генерации электроэнергии. Одним из наиболее критических этапов работы таких электростанций является запуск установки, так как он требует одновременного решения противоречивых задач - например, минимизации выбросов загрязняющих веществ и максимизации вырабатываемой энергии. Поиск оптимального компромисса между этими задачами формулируется как задача оптимизации.

Важнейшей задачей является изучение процессов пуска и останова таких ПГУ, так как они в значительной степени влияют на процессы, происходящие в энергетической сети. В рамках данной статьи рассмотрены вопросы пуска и останова ПГУ из холодного, теплого вида пусков.

Материалы и методы

В данной статье представлены результаты анализа влияния различных элементов парогазовой установки на процессы пуска из различных состояний. Как известно, пуск тепловой электрической станции на базе газотурбинной установки, в хвостовой части которой установлен котел утилизатор и паровая турбина, является достаточно сложным. В процесс включения следует учитывать процессы, происходящие в компрессоре,

газовой турбине, котле утилизаторе, а также в паровой турбине. Исходя из этого, в статье рассмотрены все эти процессы с учетом времени пуска и влияния каждого элемента на общее время пуска.

Результаты и обсуждение

Согласно [6] под маневренными показателями подразумевают время пуска и останова, а также скорость изменения нагрузки в зависимости от показателей электрической сети. Согласно тому же источнику [6, стр.363], время пуска до взятия полной нагрузки составляет 60 минут при пуске из теплового состояния и 90 минут после холодного.

В [6, стр. 365] приводятся данные по пусковым характеристикам дубли-блочной ПГУ с ГТУ MS7001E (GE-Hitachi).

Согласно представленным данным, из горячего состояния блок ПГУ выходит на полную мощность за 45-47 минут. Причем такие параметры как температура в пароперегревателе достигается номинальной за 40 минут. В случае пуска из неостывшего состояния набор номинальной мощности происходит за 135 минут. Причем набор идет скачкообразно. На 110-120 минут достигается половина мощности, а затем за на 130 минут достигается номинальная мощность.

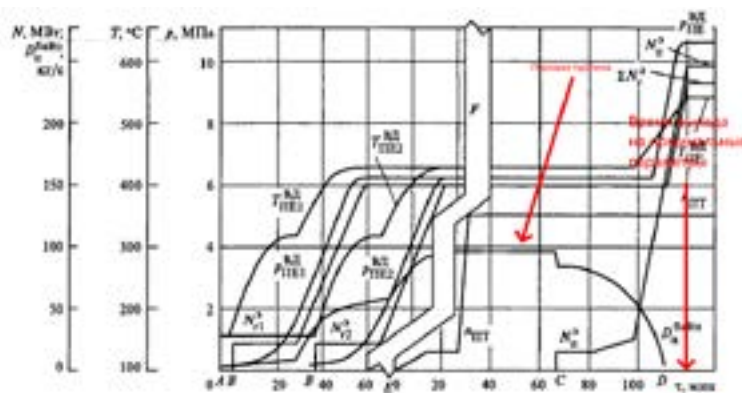


Рисунок 1 – Пуск из холодного состояния дубли-блочной ПГУ [6, стр. 363]

В [6, стр. 369] представлены графики пуска одновальной ПГУ мощностью 230 МВт. На рисунке видно, что из холодного состояния ПГУ запускается за 160 мин. Причем мощность ПГУ набирается значительно быстрее, в виду долгого времени прогрева паротурбинной части. Причем следует учитывать, что в данном графике представлена одновальная ПГУ и набор оборотов ГТУ связан с паротурбинной частью.

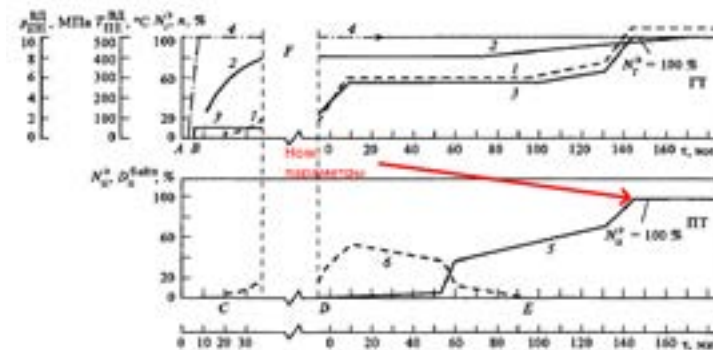


Рисунок 2 – Пуск из холодного состояния одновальной ПГУ [6, стр. 363]

В работе [7] представлены результаты динамического моделирования парогазовой установки мощностью 315 МВт. Схема ПГУ была смоделирована в программах Dymola с использованием библиотеки для моделирования тепловых станций. На рисунке 3 представлены результаты анализа пуска газотурбинной установки. Показано время набора мощности ГТУ в зависимости от времени и оптимизационных параметров. Согласно представленным данным, ГТУ набирает мощность за 3500-5000 секунд, что равно 58-83 минутам.

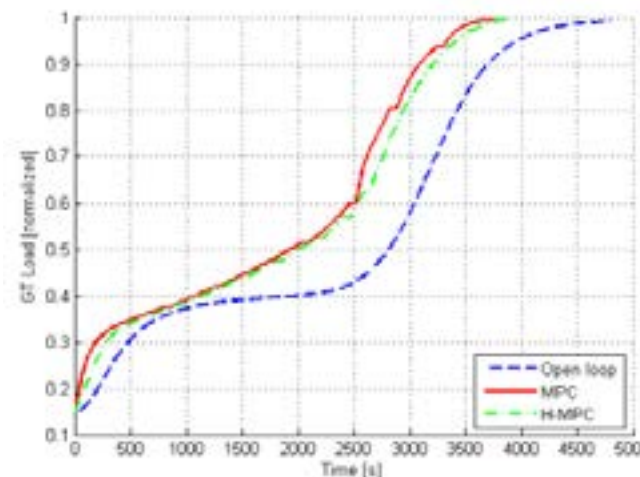


Рисунок 3 – Динамическая модель ГТУ и время набора нагрузки [7]

В работе [8] проведено моделирование динамического старта парогазовой установки в таких средах как Modelica и Simulink. В виду сложности моделирования, анализ набора нагрузки определялся опосредованно через температуру газов на входе в турбину. Как видно из рисунка, набор мощности проходит в несколько этапов. Первый этап повышение температуры до максимума, затем плавное снижение и выход на номинальные значения. Выход на номинальные значения составляет приблизительно 6000 секунд или 100 минут.

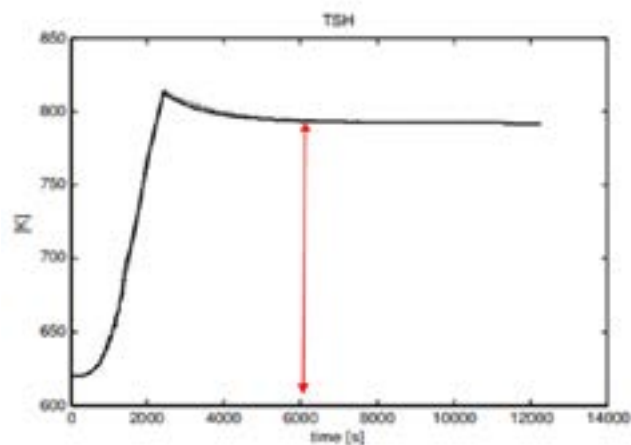


Рисунок 4 – Набор нагрузки выраженной через температуру газов [8]

В работе [9] представлен график выхода на полную нагрузку парогазовой установки. Как видно из рисунка, набор мощности проходит в несколько этапов. На первом этапе идет медленный набор мощности от 0 до 10 %. Так как в статье рассматривался ПГУ с тремя цилиндрами давления то пуск осуществляется поэтапно на каждой турбине. На первом этапе первая газовая турбина включается и после синхронизации остается на нагрузке равной 10 %. Первый котел утилизатор начинает прогреваться на минимальной нагрузке газовой турбины. После того как показатели пара достигают необходимых значений, начинается пуск паровой турбины.

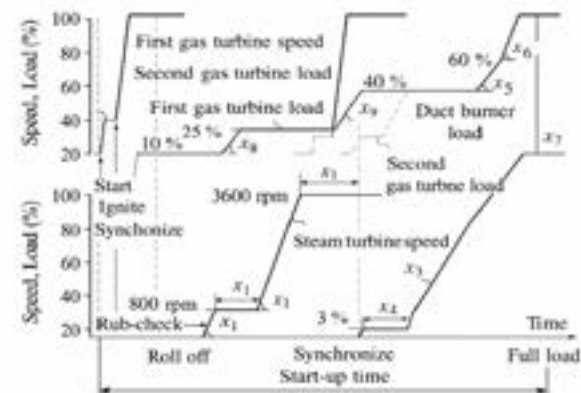


Рисунок-5 – Набор скорости паровой и газовой турбин ПГУ

В этой же работе отмечается, что существуют проблемы ограничивающие скорость пуска ПГУ. В частности отмечается что с точки зрения надежности пусковые операции являются самыми важными в виду наличия значительных термических и механических напряжений при операциях пуска. Это напрямую влияет на срок службы оборудования. Это легко понять и по паспортным данным энергетического оборудования, в которых помимо срока служба дается и количество пусковых и остановочных операций. Термические напряжения возникают в различных элементах парогазовых установок. Особенно это важно для паровых турбин. В частности в паровых турбинах возникают термические напряжения на поверхностях роторов при высоких и скользящих параметрах пара.

В работе [10] представлена динамическая модель элементов парогазовой установки. Отмечается, что время пуска помимо того, что влияет на срок службы оборудования, также влияет на экологию. В виду того, что во время пуска расходуется топливо, то от него зависит сколько топлива было потрачено не на генерацию.

На рисунке 6 представлены динамические характеристики турбины в моменты пуска. На графике представлены массовые расходы, температура уходящих газов и мощность паровой турбины. Из представленных данных видно, что набор мощности паровой турбины достаточно долг и занимает не менее 100 минут. Из графиков видно, что стабилизация параметров происходит приблизительно на 150 минуте. Также из графика наблюдается провал в массовом расходе и мощности турбины на 430 минуте.

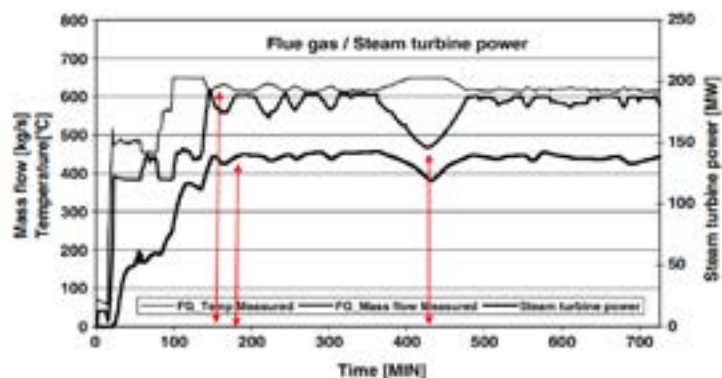


Рисунок 6 – Динамические характеристики паровой турбины в цикле ПГУ [10]

Аналогичный анализ был проведен в работе [11]. В ней описывается создание динамической модели на базе искусственного интеллекта, в частности, методы нечеткой логики и эволюционные вычисления для оптимизации фазы запуска парогазовой электростанции. На рисунке 7 представлен график пуска парогазовой установки.

С начальной точки 0 секунды и приблизительно до 3000 секунд скорость оборотов газовой турбины доходит до 3000 оборотов в минуту. То есть промежуток между 0 и t_1 . Затем между промежутками t_0 и t_1 мощность газовой турбины устанавливается на 10 МВт. Далее до времени t_2 турбина не изменяет своей мощности. После этого в период между t_2 и t_3 , что приблизительно равно 3000 секундам турбина приобретает новую мощность между 10 и 270 МВт. На точке t_4 турбина должна набрать номинальную мощность. Как представлено в статье, время t_4 и t_3 можно оптимизировать за счет различных подходов.

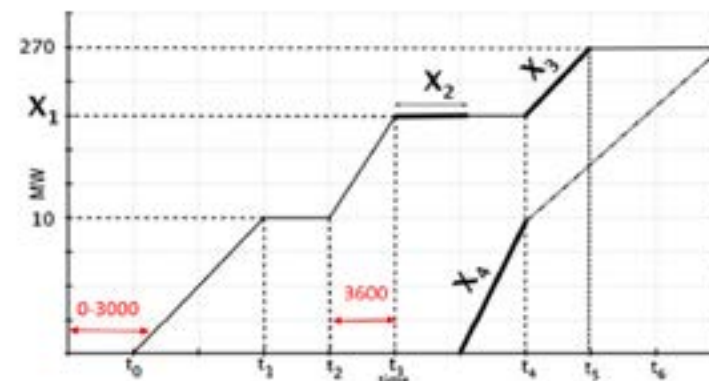


Рисунок-7 – Время пуска парогазовой установки [11]

В работе [12] представлены результаты динамического моделирования котла утилизатора. Котел утилизатор трех контурный и состоит из контура высокого среднего и низкого давлений соответственно. В составе котла утилизатора испарители пароперегреватели и экономайзеры. Отличием котла является то, что в нем установлена система дожигания газов. Важной задачей которую авторы поставили перед собой это изучение довольно сложной системы котла утилизатора с точки зрения динамики процессов. Известно, что на настоящий момент достаточно мало динамических моделей в виду сложности моделирования и учета значительного количества потоков участвующих в работе парогазовых установок.

На рисунке 8 представлены результаты динамического моделирования пуска котла утилизатора. Как видно из рисунка выход на нормальные условия котла утилизатора составляют 160-170 минут. Точка отчета 160 минут. Наиболее высокие температуры обозначенные красным цветом это температура уходящих газов. В целом можно сделать вывод, что все процессы стабилизируются на 240 минуте или же на 80 минуте если учитывать старт со 160 минуты. Можно увидеть резкое падение а затем быстрый набор температур пара высокого давления. Заметно, что приблизительно на 230 минут присутствует резкое падение с 190 до 100°C. Резкий рост температуры пара связан с ростом потребления топлива в горелочных устройствах дожигания. Причем набор температура при включении дожигания происходит за 20-30 минут. Это пример показывает, что применение системы дожигания топлива является потенциальным местом оптимизации и сокращения времени пуска парогазовой установки в целом и паросиловой части в частности.

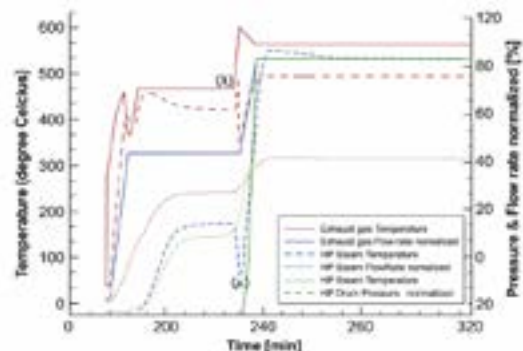


Рисунок-8 – Результаты моделирования холодного пуска котла утилизатора [12]

В работе [13] представлены результаты динамического моделирования парогазовой установки с системой дожигания. Авторы провели моделирование в системе APROS. В статье проведены исследования возможности сокращения времени старта парогазовой установки. На рисунке 9 представлен график зависимости массового расхода уходящих газов за газовой турбиной в зависимости от типа пуска. Как видно из рисунка, наиболее долгий пуск соответствует холодному пуску. Время выхода на номинальные параметры равные 450 кг/с составляет 210–220 минут. За это время компрессор и газовая турбина набирает необходимые обороты. Для неостывшего пуска время составляет 110–120 минут. Для пуска из теплого состояния время пуска составляет 50–55 минут. Причем как видно из графика существует возможность повышения времени пуска.

В результате моделирования авторы показали, что существует возможность сокращения времени пуска на 38 %, 31 % и 20 % из горячего, неостывшего и холодного состояния за счет дожигания газов в котле утилизаторе.

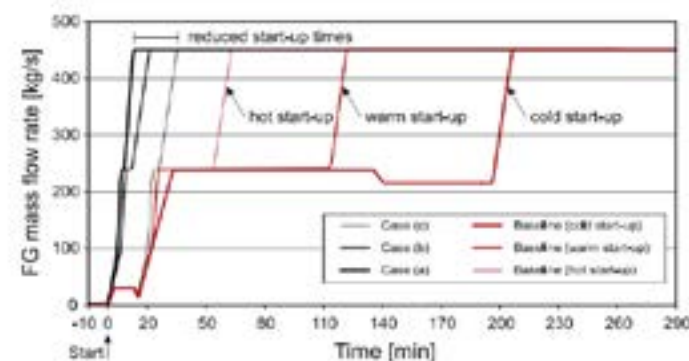


Рисунок-9 – Результаты моделирования пуска газовой турбины из различных состояний [13]

В работе [14] представлены результаты моделирования парогазовой установки в программе ASPEN Plus. Для моделирования были использованы стандартные элементы, встроенные в программу. В результате моделирования были получены динамические характеристики парогазовой установки. В рамках моделирования не были включены элементы газовой турбины, они были учтены лишь как потоки.

Проведенные исследования показывают, что существует возможность создание динамической модели для изучения процессов, связанных со временем. Это является актуальной задачей в виду того, что стационарные процессы не могут в полной мере показать сложности процессов.

Аналогичные работы по исследованию динамических процессов были проведены в работе [15]. В ней авторы создали модели тепловой электростанции, работающей на паросиловом цикле с углем в качестве основного топлива. Особенностью работы является моделирование улавливания CO₂. Это является актуальной задачей на настоящий момент.

Выводы

Проведенный широкий анализ методов моделирования парогазовых установок показывает, что существует достаточно большой спрос на подобные исследования. Большое количество авторов посвятили свои работы моделированию переходных процессов – пуска и останова. Эти задачи являются важными с точки зрения экономии ресурсов и надежности электрической сети.

Учитывая значительной возросший интерес мирового энергетического сообщества к парогазовым установкам в виду их высоких показателей КПД и высокой маневренности, следует обратить внимание на пусковые операции.

Более того, как показал анализ, в настоящее время в Казахстана планируется построить не менее 4 парогазовых установок. Причем значительная часть будет в южных регионах страны, где проживает большая часть населения страны. Это приводит к необходимости повышения надежности энергоснабжения как стратегического аспекта безопасности.

Как показал анализ, время пуска в значительной степени зависит от типа газотурбинной установки и паровой турбины. Более того, если пуск из горячего состояния имеет длительность не более часа, то пуск из холодного состояния достигает нескольких часов. Поэтому важно определить методы и подходы к снижению этого времени с учетом надежности оборудования.

Будущие планы исследования

Следует обратить внимание на динамические модели парогазовых установок. Важным аспектом является снижение времени пуска и учет электрических показателей и влияние на сеть.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1 Nowak, G., Rusin, A., Łukowicz, H., Tomala, M. Improving the power unit operation flexibility by the turbine start-up optimization // *Energy*. – 2020. – Vol. 198. – 117303. – <https://doi.org/10.1016/j.energy.2020.117303>.

2 KEGOC. Годовой отчёт 2024 [Электронный ресурс]. – <https://www.kegoc.kz/ru/for-investors-and-shareholders/raskrytie-informatsii/annual-reports/>

3 Самрук-Энерго. [Электронный ресурс]. – <https://www.samruk-energy.kz/ru/press-center>

4 АО «АлЭС». Модернизация [Электронный ресурс]. – <https://www.ales.kz/home/modernization/>

5 Kursiv Media. Энергетика Казахстана [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://kz.kursiv.media/2024-02-21>

6 Цанев, С. В., Буров, В. Д., Ремезов, А. Н. Газотурбинные и парогазовые установки тепло вых электростанций. – 3-е изд. – М. : МЭИ, 2009. – 584 с.

7 Tica, A., Gueguen, H., Dumur, D., Faille, D., Davelaar, F. Hierarchical Model Predictive Control Approach for Start-up Optimization of a Combined Cycle Power Plant // IFAC Proc. Vol. – 2012. – Vol. 45. – № 21. – P. 301–306. – <https://doi.org/10.3182/20120902-4-FR-2032.00054>.

8 Casella, F., Farina, M., Righetti, F., Faille, D., Tica, A., Gueguen, H., Scattolini, R., Davelaar, F., Dumur, D. An optimization procedure of the start-up of Combined Cycle Power Plants // IFAC Proc. Vol. — 2011. – Vol. 44. – № 1. – P. 7043–7048. – <https://doi.org/10.3182/20110828-6-IT-1002.00604>.

9 Shirakawa, M., Nakamoto, M. Start-Up Schedule Optimizing System of a Combined Cycle Power Plant // IFAC Proc. Vol. – 2003. – Vol. 36. – № 20. – P. 261–266. – [https://doi.org/10.1016/S1474-6670\(17\)34477-4](https://doi.org/10.1016/S1474-6670(17)34477-4).

10 Alobaid, F., Postler, R., Ströhle, J., Epple, B., Kim, H. Modeling and investigation start-up procedures of a combined cycle power plant // *Applied Energy*. – 2008. – Vol. 85. – № 12. – P. 1173–1189. – <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2008.03.003>.

11 Bertini, I., De Felice, M., Pannicelli, A., Pizzuti, S. Soft computing-based optimization of combined cycled power plant start-up operation with fitness approximation methods // *Applied Soft Computing*. – 2011. – Vol. 11. – № 6. – P. 4110–4116. – <https://doi.org/10.1016/j.asoc.2011.02.028>.

12 Cha, H., Song, Y.S., Kim, K. J., Kim, J. R., Kim, S. M. Dynamic Simulation of a HRSG System for a Given Start-Up/Shut Down Curve // Proc. ASME Int. Mech. Eng. Congr. Expo. — Denver, USA. – 2011. – Vol. 6. – P. 285–289. – <https://doi.org/10.1115/IMECE2011-62468>.

13 Alobaid, F. Start-up improvement of a supplementary-fired large combined-cycle power plant // *Journal of Process Control*. – 2018. – Vol. 64. – P. 71–88. – <https://doi.org/10.1016/j.jprocont.2018.02.007>.

14 Sabia, G., Heinze, C., Alobaid, F., Martelli, E., Epple, B. ASPEN Dynamics simulation for combined cycle power plant – Validation with hot start-up measurement // *Energy*. – 2019. – Vol. 187. – 115897. – <https://doi.org/10.1016/j.energy.2019.115897>.

15 Marx-Schubach, T., Schmitz, G. Modeling and simulation of the start-up process of coal-fired power plants with post-combustion CO₂ capture // *Int. J. Greenhouse Gas Control*. – 2019. – Vol. 87. – P. 44–57. – <https://doi.org/10.1016/j.ijggc.2019.05.003>.

REFERENCES

1 Nowak, G., Rusin, A., Łukowicz, H., Tomala, M. Improving the power unit operation flexibility by the turbine start-up optimization. *Energy* 2020. – 198, 117303. – <https://doi.org/10.1016/j.energy.2020.117303>.

2 KEGOC. *Godovoi otchet 2024* [Annual Report 2024]. Available online: <https://www.kegoc.kz/ru/for-investors-and-shareholders/raskrytie-informatsii/annual-reports/> (accessed on 7 Nov 2025).

3 Samruk-Energo. [Press Center]. Available online: <https://www.samruk-energy.kz/ru/press-center> (accessed on 7 Nov 2025).

4 АО «АИЭС». *Modernizatsiia* [Modernization]. Available online: <https://www.ales.kz/home/modernization/> (Accessed on 7 Nov 2025).

5 **Kursiv Media**. *Energetika Kazakhstana* [Energy of Kazakhstan]. Available online: <https://kz.kursiv.media/2024-02-21> (accessed on 7 Nov 2025).

6 **Tsanev, S. V., Burov, V. D., Remezov, A. N.** Gazoturbinnye i parogazovye ustanovki teplovykh elektrostantsii [Gas Turbine and Combined-Cycle Plants of Thermal Power Stations]; 3rd ed.; Moscow: MEI, 2009; 584 p. (In Russian).

7 **Tica, A., Gueguen, H., Dumur, D., Faille, D., Davelaar, F.** Hierarchical Model Predictive Control Approach for Start-up Optimization of a Combined Cycle Power Plant. *IFAC Proc.* Vol. 2012. – 45 (21). – 301–306. – <https://doi.org/10.3182/20120902-4-FR-2032.00054>.

8 **Casella, F., Farina, M., Righetti, F., Faille, D., Tica, A., Gueguen, H., Scattolini, R., Davelaar, F., Dumur, D.** An optimization procedure of the start-up of Combined Cycle Power Plants. *IFAC Proc. Vol.* 2011, 44 (1), 7043–7048. <https://doi.org/10.3182/20110828-6-IT-1002.00604>.

9 **Shirakawa, M., Nakamoto, M.** Start-Up Schedule Optimizing System of a Combined Cycle Power Plant. *IFAC Proc. Vol.* 2003 – 36 (20) – 261–266. – [https://doi.org/10.1016/S1474-6670\(17\)34477-4](https://doi.org/10.1016/S1474-6670(17)34477-4).

10 **Alobaid, F., Postler, R., Ströhle, J., Epple, B., Kim, H.** Modeling and investigation start-up procedures of a combined cycle power plant. *Applied Energy* 2008, 85 (12) – 1173–1189. – <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2008.03.003>.

11 **Bertini, I., De Felice, M., Pannicelli, A., Pizzuti, S.** Soft computing-based optimization of combined cycled power plant start-up operation with fitness approximation methods. *Applied Soft Computing* 2011. – 11 (6). – 4110–4116. – <https://doi.org/10.1016/j.asoc.2011.02.028>.

12 **Cha, H., Song, Y. S., Kim, K. J., Kim, J. R., Kim, S. M.** Dynamic Simulation of a HRSG System for a Given Start-Up/Shut Down Curve. *Proc. ASME Int. Mech. Eng. Congr. Expo.* 2011. – 6, 285–289. – <https://doi.org/10.1115/IMECE2011-62468>.

13 **Alobaid, F.** Start-up improvement of a supplementary-fired large combined-cycle power plant. *Journal of Process Control* 2018, 64, 71–88. – <https://doi.org/10.1016/j.procont.2018.02.007>.

14 **Sabia, G., Heinze, C., Alobaid, F., Martelli, E., Epple, B.** ASPEN Dynamics simulation for combined cycle power plant – Validation with hot start-up measurement. *Energy* 2019. – 187 – 115897. – <https://doi.org/10.1016/j.energy.2019.115897>.

15 **Marx-Schubach, T., Schmitz, G.** Modeling and simulation of the start-up process of coal-fired power plants with post-combustion CO₂ capture. *Int. J. Greenhouse Gas Control* 2019, 87, 44–57. – <https://doi.org/10.1016/j.ijggc.2019.05.003>.

Поступило в редакцию 22.09.25

Поступило с исправлениями 11.11.25

Принято в печать 05.12.25

**М. М. Умышева¹, Е. А. Сарсенбаев², Д. Р. Умышев³*

^{1,2,3}Қ.И. Сәтбаев атындағы Қазақ Ұлттық Техникалық Зерттеу

Университеті, Қазақстан Республикасы, Алматы қ.

22.09.25 ж. баспаға түсті.

11.11.25 ж. түзетулерімен түсті.

05.12.25 ж. басып шығаруға қабылданды.

БУ-ГАЗ ҚОНДЫРҒЫЛАРЫНЫҢ ІСКЕ ҚОСУ ОПЕРАЦИЯЛАРЫН ТАЛДАУ

Бұл мақалада бу-газ қондырғыларының іске қосу операцияларына талдау жасалды. Модельдеу және ұшыру бойынша нақты деректер бойынша әртүрлі авторлар алған нәтижелер жинақталған. Іске қосу операциялары кезінде туындайтын негізгі проблемалар қамтылған. Іске қосу операциялары энергетикалық көрсеткіштер тұрғысынан, сондай-ақ энергетикалық жабдықтың механикалық сенімділігі тұрғысынан қымбат екендігі көрсетілген. Мақалада нақты объектілерде осындай зерттеулерді жүргізудің едәуір күрделілігіне байланысты энергетикалық жабдықты модельдеу технологияларына баса назар аударылады.

Тұтастай алғанда, талдау бу-газ қондырғыларының іске қосылуы көрсеткіштердің айтарлықтай санымен байланысты екенін көрсетті. Атап айтқанда, жану камерасынан кейінгі газдардың температурасы, шығатын газдар. Іске қосу процедурасының ең ұзақ бөлігі бу бөлігінің элементтерінің механикалық сенімділігіне қойылатын талаптарды сақтау қажеттілігіне байланысты бу бөліміне қатысты екендігі көрсетілген.

Талдау нәтижесінде кәдеге жарату қазандығы арқылы іске қосу уақытын азайтудың үлкен әлеуеті бар екендігі көрсетілді. Атап айтқанда, кәдеге жарату қазандығында газды жағу технологиясын қолдану бу турбинасының алдындағы жаңа будың қажетті параметрлерін теру уақытын едәуір азайтады. Атап айтқанда, күйдіруді қолдану арқылы номиналды параметрлерді теру уақыты бу-газ қондырғысының салқындатылмаған іске қосылуымен 31% - га қысқаруы мүмкін екендігі көрсетілген.

Кілтті сөздер: Бу-газ қондырғысы, модельдеу, уақыт, талдау, іске қосу.

**M. M. Umysheva*¹, *E. A. Sarsenbayev*², *D. R. Umyshev*³

^{1,2,3}Kazakh National Research Technical University named after K. I. Satbayev, Republic of Kazakhstan, Almaty.

Received 22.09.25.

Received in revised form 11.11.25.

Accepted for publication 05.12.25.

ANALYSIS OF START-UP OPERATIONS OF COMBINED-CYCLE GAS INSTALLATIONS

This article analyzes the start-up operations of combined-cycle gas installations. The results obtained by various authors on modeling and real launch data are summarized. The main problems that arise during launch operations are highlighted. It is shown that start-up operations are costly in terms of energy performance, as well as in terms of mechanical reliability of power equipment. The article focuses on technologies for modeling energy equipment due to the rather high complexity of conducting such studies on real objects.

In general, the analysis showed that the start-up of combined-cycle gas plants is associated with a significant number of indicators. In particular, the temperatures of gases after the combustion chamber, exhaust gases. It is shown that the longest part of the start-up procedure relates to the steam power unit due to the need to comply with the requirements for the mechanical reliability of the elements of the steam power unit.

As a result of the analysis, it was shown that there is a great potential to reduce the start-up time due to the recovery boiler. In particular, the use of afterburning technology in the recovery boiler significantly reduces the time for setting the necessary parameters of fresh steam in front of the steam turbine. In particular, it is shown that with the use of afterburning, the set time of nominal parameters can be reduced by 31 % with a continuous start-up of a combined-cycle gas plant.

Keywords: Combined-cycle gas plant, modeling, time, analysis, start-up.

АВТОРЛАР ТУРАЛЫ АҚПАРАТ

Айкимбаева Дина Даулетовна, магистр, арнайы пәндер оқытушысы, ШЖҚ «Жоғары көлік және коммуникация колледжі» МКК, Астана қ., Қазақстан Республикасы, e-mail: darkhan_s05@mail.ru, <https://orcid.org/0009-0005-6182-9220>

Айтқалиева Гүлзат Сляшқызы, PhD, қауымд. профессор, Геология және мұнай-газ ісі институты, Satbayev University, Алматы қ., 050013, Қазақстан Республикасы, e-mail: g.aitkaliyeva@satbayev.university, <https://orcid.org/0000-0001-9872-6317>

Арипова Назгуль Михайловна, қауымд. профессор, Жылу энергетика кафедрасы, Торайғыров университеті, Павлодар қ., 140008, Қазақстан Республикасы, e-mail: nazgul_2010@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0003-2760-8617>

Агажанов Алибек Шаяхметович, ғылыми қызметкер, Физика-математика ғылымдардың кандидаты, С. С. Кутателадзе атындағы Жылуфизика институты, Новосибир қ., 630090, Ресей Федерациясы, e-mail: scousekz@gmail.com, <https://orcid.org/0000-0003-0461-7211>

Анарбаев Алибек Ерсанович, аға оқытушы, энергетика факультеті, Торайғыров университеті, Қазақстан Республикасы, Павлодар қ., 140008, e-mail: alibek_anarbaev@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0001-6890-8005>

Абдрахманов Бауыржан Тендикевич, аға оқытушы, энергетика факультеті, Торайғыров университеті, Павлодар қ., 140008, Қазақстан Республикасы, e-mail: bauyrymten@mail.ru, <https://orcid.org/0009-0002-7817-1275>

Аябаев Асыл Серикбаевич, магистрант, Энергетика факультеті, Торайғыров университеті, Павлодар қ., 140008, Қазақстан Республикасы, e-mail: ayabayev@bk.ru, <https://orcid.org/0009-0006-1515-1233>

Айтмагамбетов Алтай Зуфарович, техникалық ғылымдар кандидаты, профессор, «Радиотехника, электроника және телекоммуникациялар» кафедрасы, Алматы қаласындағы Халықаралық ақпараттық технологиялар университеті, Алматы қ. 050040, Қазақстан Республикасы, e-mail: a.aitmagambetov@iitu.edu.kz, <https://orcid.org/0000-0002-7808-5273>

Алихан Ұлан Батырханұлы, «Электр энергетикасы (Жаңартпалы энергетика)» мамандығы бойынша магистрант, Қорқыт Ата атындағы Қызылорда университеті, Инженерлі-технологиялық институты, Қызылорда қ., 020000, Қазақстан Республикасы, e-mail: alikhhan.ulan@mail.ru, <https://orcid.org/0009-0002-6571-0348>

Атякшева Александра Владимировна, доцент, жылу энергетика кафедрасы, С. Сейфуллин атындағы Қазақ агротехникалық зерттеу

университеті, Астана қ., 010011, Қазақстан Республикасы, e-mail: sahsa77@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0003-2523-3890>

Алимгазин Алтай Шурумбаевич, техника ғылымдарының докторы, профессор, Л. Н. Гумилев атындағы Еуразия ұлттық университеті, Астана қ., 010008, Қазақстан Республикасы, e-mail: alimgazin_altai@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0002-5848-1842>

Батырбек Әлібек Есімбекұлы, «Автоматтандыру және басқару» білім беру бағдарламасы бойынша докторант, Энергетика, көлік және басқару жүйелері факультеті, Қарағанды индустриялық университеті, Теміртау қ., 101400, Қазақстан Республикасы, e-mail: alibek_batyrbek@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0002-3369-6804>

Байжұма Жандос Ескендірұлы, PhD, м.а доцент, әл-Фараби атындағы Қазақ Ұлттық университеті, Алматы қ., 050013, Қазақстан Республикасы, zhan-dos.baizhuma@kaznu.kz, <https://orcid.org/0000-0003-3692-2245>

Бердибеков Абдисаттар Опабекович, PhD студенті, Қ. И. Сәтбаев атындағы Қазақ ұлттық зерттеу техникалық университеті (ҚазҰЗТУ), Алматы қ., 050013, Қазақстан Республикасы, e-mail: a.berdibekov@satbayev.university, <https://orcid.org/0000-0001-5943-432X>

Бекбаев Амангельды, техника ғылымдарының докторы, профессор, Қ. И. Сәтбаев атындағы Қазақ ұлттық зерттеу техникалық университеті, Алматы қ., 050000, Қазақстан Республикасы, e-mail: a.bekbayev@satbayev.university.kz, <https://orcid.org/0000-0003-3520-1710>

Бекболатова Жаннат Қайырқызы, PhD, қауымд. профессор Қ. И. Сәтбаев атындағы Қазақ ұлттық зерттеу техникалық университеті, Алматы қ., 050000, Қазақстан Республикасы, e-mail: zh.bekbolatova@satbayev.university, <https://orcid.org/0000-0002-8219-6400>

Белый Александр Владимирович, География ғылымдарының кандидаты, профессор, География және туризм кафедрасы, Торайғыров университеті, Астана қ., 010000, Қазақстан Республикасы, alexander.belyi@mail.ru

Байдилдина Айжан Төлеубековна, PhD, қауымд. профессор, Д. Серікбаев атындағы Шығыс Қазақстан техникалық университеті, Өскемен қ., 070016, Қазақстан Республикасы, azhapparova@edu.ektu.kz, <https://orcid.org/0000-0002-3793-5817>

Барукин Александр Сергеевич, PhD, профессор, Энергетика факультеті, Торайғыров университеті, Павлодар қ., 140008, Қазақстан Республикасы, e-mail: alexbarukin@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0002-5969-4030>

Байбейсенова Қымбат Берікқанқызы, 7M08705 – Ауыл шаруашылығын энергиямен жабдықтау және автоматтандыру білім беру бағдарламасы бойынша 1 курс магистранты, С. Сейфуллин атындағы Қазақ агротехникалық

зерттеу университеті, Астана қ., 010000, Қазақстан Республикасы, e-mail: baibeisenovakima@gmail.com, <https://orcid.org/0009-0007-8482-8604>

Бекишева Жанна Таукеновна, техника ғылымдарының магистранты, аға оқытушысы, Жылу энергетикасы кафедрасы, Энергетикалық факультеті, С. Сейфуллин атындағы Қазақ агротехникалық зерттеу университеті, Астана қ., 010000, Қазақстан Республикасы, e-mail: Zhanna_1986_23@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0001-9224-2426>

Габдулов Асет Уралбаевич, «Жылуэнергетика» мамандығы бойынша докторант, Энергетика факультеті, Торайғыров университеті, Павлодар қ., 140008, Қазақстан Республикасы, e-mail: gabdulov25@mail.ru, <https://orcid.org/0009-0001-3266-8270>

Достияров Абай Мұхамедиярұлы, техника ғылымдарының докторы, «Жылуэнергетика және физика» кафедрасы, профессоры, Жылу энергетикасы және басқару жүйелері институты, Г. Даукеев атындағы Алматы энергетика және байланыс университеті, Алматы қ., 050000, Қазақстан Республикасы, a.m.dost1951@gmail.com, <https://orcid.org/0000-0002-6559-8598>

Джанарғалиева Малика Руслановна, магистрант, География және туризм кафедрасы, Торайғыров университеті, Павлодар қ., 140000, Қазақстан Республикасы, e-mail: malika_28-01@mail.ru,

Дүйсембаева Гульнур Сейтхановна, 1 курс докторанты, 8D07103 - Жылу энергетикасы мамандығының Д. Серікбаев атындағы Шығыс Қазақстан техникалық университеті, Өскемен қ., 070016, Қазақстан Республикасы, gdyusembaeva80@mail.ru, <https://orcid.org/0009-0003-5059-8223>

Дайнеко Евгения Александровна, PhD, қауымд. профессор, Автоматтандыру және ақпараттық технологиялар институтының директоры, Satbayev University. «Компьютерлік инженерия», кафедрасы, Халықаралық ақпараттық технологиялар университеті, Алматы қ. 050040, Қазақстан Республикасы, e-mail: y.daineko@iitu.edu.kz, <https://orcid.org/0000-0001-6581-2622>

Динмуханбетова Айгуль Жумагельдыевна, PhD, қауымд. профессор, Энергетика факультеті, Торайғыров университеті, Павлодар қ., 140008, Қазақстан Республикасы, e-mail: ardi100909@mail.ru, <https://orcid.org/0009-0005-8325-9724>

Бергузинов Асхат Нурланович, PhD, профессор, Торайғыров университеті, Павлодар қ., 140008, Қазақстан Республикасы, e-mail: askhat_berguzinov@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0001-6954-8259>

Есимова Динара Даутовна, Педагогика ғылымдарының кандидаты, «География және туризм» кафедрасы, меңгерушісі, Торайғыров университеті, Павлодар қ., 140000, Қазақстан Республикасы, e-mail: dika-73@mail.ru

Есім Аяна Қазбекқызы, «Қызмет көрсету саласы» бағыты бойынша докторант, Л. Н. Гумилев атындағы ЕҰУ Астана қ., 010000, Қазақстан Республикасы, e-mail: ayana_esimova99@mail.ru

Есмаханова Лаура Нурлановна, PhD, «Автоматтандыру және телекоммуникация» кафедрасы, Технологиялық факультет, М. Х. Дулати атындағы Тараз университеті, Тараз қ., 080000, Қазақстан Республикасы, <https://orcid.org/0000-0002-3308-9676>, e-mail: laura060780@mail.ru

Жуматова Асель Акановна, Техника ғылымдарының кандидаты, қауымд. профессор, Қ. И. Сәтбаев атындағы Қазақ ұлттық зерттеу техникалық университеті, Алматы қ., 050000, Қазақстан Республикасы, e-mail: a.zhumatova@satbayev.university.kz, <https://orcid.org/0000-0001-9606-7557>

Жалмағамбетова Ұлтуар Каирбулатқызы, PhD, «Жылуэнергетика» кафедрасы, профессор, Энергетика, факультеті, Қазақстан Республикасы, Павлодар қ., 140008, e-mail: ultuara@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0002-2261-2222>

Жантілесова Әсемгүл Бейсембайқызы, PhD, м. а. қауымд. профессор (доцент), Қазақ мемлекеттік университеті Сейфуллин, А., Қазақстан Республикасы, Астана қ. 010008, e-mail: acbizh@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0003-3730-0579>

Жансерікқызы Ақнұр, техника ғылымдарының магистрі, Қорқыт Ата атындағы Қызылорда университеті, Инженерлі-технологиялық институты, Қызылорда қ., 020000, Қазақстан Республикасы, e-mail: zhanserikkyzy@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0002-6164-6775>

Ильясова Гулжан Оспанбековна, Жылуэнергетика мамандығы бойынша докторант, әл-Фараби атындағы Қазақ Ұлттық университеті, Алматы қ., 050000-050063, Қазақстан Республикасы, e-mail: liyasovagulzhan@mail.ru, <https://orcid.org/0009-0008-6205-4959>

Иманаев Марат Шамильевич, Павлодар жылу желілері ЖШС Директоры Павлодар қ., 140000, Қазақстан Республикасы, e-mail: M.Imanaev@pavlodarenergo.kz

Исабекова Бибігүл Бейсембайқызы, PhD, қауымд. профессор (доцент), Computer science факультеті, Торайғыров университеті, Павлодар қ., 140008, Қазақстан Республикасы, <https://orcid.org/0000-0001-5044-3211>, e-mail: asbizh@mail.ru

Исабеков Жанат Бейсембайұлы, PhD, қауымд. профессор (доцент), меңгеруші, "Электротехника және автоматтандыру" кафедрасы, Энергетика факультеті, Торайғыров университеті, Павлодар қ., 140008, Қазақстан Республикасы, <https://orcid.org/0000-0003-3980-1617>, e-mail: zh_is@mail.ru

Исаев Валерий Львович, техника ғылымдарының кандидаты, «Энергетикалық жүйелер» кафедрасы Әбілқас Сағынов атындағы Қарағанды

техникалық университеті, Қарағанды қ., 100027, Қазақстан Республикасы, <https://orcid.org/0000-0003-1187-4638>, e-mail: isaevvalerie@gmail.com

Исмаилова Айғаным Бахтияровна, PhD, қауымд. профессор, Халықаралық білім беру корпорациясы, Қазақ бас сәулет-құрылыс академиясы, доцент, Алматы қ., 050043, Қазақстан Республикасы, e-mail: i-smile@bk.ru, <https://orcid.org/0000-0002-4234-0615>

Исенов Сұлтанбек Сансызбаевич, техника ғылымдарының кандидаты, қауымд. профессор, С. Сейфуллин атындағы Қазақ агротехникалық зерттеу университеті, Астана қ. 010000, Қазақстан Республикасы, e-mail: issenov.sultanbek@gmail.com, <https://orcid.org/0000-0003-4576-4621>

Калытка Валерий Александрович, PhD, қауымд. профессор «Энергетикалық жүйелер» кафедрасы, Әбілқас Сағынов атындағы Қарағанды техникалық университеті, Қарағанды қ., 100027, Қазақстан Республикасы, <https://orcid.org/0000-0002-3232-1285>, e-mail: kalytk@mail.ru

Камарова Сауле Нургазаевна, PhD, Қарағанды индустриялық университеті, «Энергетика» кафедрасы, доценті, Қарағанды облысы, Теміртау қ., 101400, Қазақстан Республикасы, e-mail: cfekt.rfvfjhjdf@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0001-8464-7204>

Қаласов Нұрдәулет Болатұлы, PhD, м.а доцент, әл-Фараби атындағы Қазақ Ұлттық университеті, Алматы қ., 050000-050063, Қазақстан Республикасы, e-mail: kalasov.nurdaulet@gmail.com, <https://orcid.org/0000-0003-3709-5544>

Катранова Газиза Сериковна, PhD, British American Tobacco компаниясы, Алматы қ., 050000, Қазақстан Республикасы, e-mail: gaziza.katranova@mail.com, <https://orcid.org/0000-0003-0688-5324>

Карманов Амангельды Ерболович, PhD, меңгеруші, «Жылуэнергетика» кафедрасы, Торайғыров университеті, Павлодар қ., 140008, Қазақстан Республикасы, e-mail: aman270685@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0001-7512-0275>

Канапинов Медет Серикович, PhD, аға оқытушы, Д. Серікбаев атындағы Шығыс Қазақстан техникалық университеті, Өскемен қ., 070016, Қазақстан Республикасы, e-mail: mega_bum_90@mail.ru, <https://orcid.org/0009-0002-6249-2373>

Кулакаева Айгуль Ергалиевна, PhD, «Радиотехника, электроника және телекоммуникациялар» кафедрасы, қауымд. профессоры, Алматы қаласындағы Халықаралық ақпараттық технологиялар университеті, Алматы қ., 050040, Қазақстан Республикасы, e-mail: a.kulakayeva@iitu.edu.kz, <https://orcid.org/0000-0002-0143-085X>

Кислов Александр Петрович, техника ғылымдарының кандидаты, доцент, профессор, Энергетика факультеті, Торайғыров университеті,

Павлодар қ., 140008, Қазақстан Республикасы, e-mail: kislovpsu@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0003-4816-8008>

Кулакаева Айгуль Ергалиевна, PhD, қауымд. профессор, «Радиотехника, электроника және телекоммуникациялар» кафедрасы, Алматы қаласындағы Халықаралық ақпараттық технологиялар университеті 050040, Алматы қ. Қазақстан Республикасы; e-mail: a.kulakayeva@iitu.edu.kz, <https://orcid.org/0000-0002-0143-085X>

Кожаметова Бағдат Абдурашидовна, «Радиотехника, электроника және телекоммуникациялар» кафедрасы, ассистент-профессоры, Алматы қаласындағы Халықаралық ақпараттық технологиялар университеті, 050040, Алматы қ., Қазақстан Республикасы, e-mail: kozahmetova.ba@gmail.com <https://orcid.org/0000-0002-9566-3629>

Кушанова Динара Қазбекқызы, «Көмірсутек қосылыстарының химиялық инжинирингі» мамандығы бойынша магистрант, Геология және мұнай-газ ісі институты, Satbayev University, Алматы қ., 050013, Қазақстан Республикасы, e-mail: 88dilya@gmail.com, <https://orcid.org/0009-0002-3058-7634>

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, <https://orcid.org/0000-0001-9485-0425>

Құдайберген Зұлқарнайын Русланұлы, білім алушы, Қорқыт Ата атындағы Қызылорда университеті, Инженерлі-технологиялық институты, Қызылорда қ., 020000, Қазақстан Республикасы, e-mail: kudaybergenzulharnay2007@gmail.com, <https://orcid.org/0009-0006-6234-0520>

Калтаев Абдулла Габдылманапулы, PhD, қауымд. профессор (доцент), Торайғыров университеті, Павлодар қ., <https://orcid.org/0000-0003-1684-3347>

Қазыбек Жанеля Ғаниқызы, «Электр энергетика» мамандығы бойынша магистрант, «Жаңғыртылатын энергия көздері және электрмен қамтамасыз ету» кафедрасы, Ғұмарбек Дәукеев атындағы Алматы энергетика және байланыс университеті, Алматы қ., 050013 Қазақстан Республикасы, e-mail: zh.kazybek@aes.kz, <https://orcid.org/0009-0003-0230-8308>

Қуатова Анар Сталовна, С. Сейфуллин атындағы Қазақ агротехникалық зерттеу университеті, электрмен жабдықтау кафедрасы, Астана қ., 010000, Қазақстан Республикасы, e-mail: anarkuatova2019@gmail.com, <https://orcid.org/0000-0001-8972-1346>

Қаласов Нұрдәулет Болатұлы, PhD, м.а доцент, әл-Фараби атындағы Қазақ Ұлттық Университеті, Алматы қ., 050000-050063, Қазақстан Республикасы, kalasov.nurdaulet@gmail.com, <https://orcid.org/0000-0003-3709-5544>

Ларкин Виктор Александрович, «СевКазЭнергоПром» ҒӨК ЖШС бас директорының өндіріс жөніндегі орынбасары, Қазақстан Республикасы, Павлодар қ., 140006, e-mail: v.larkin@skp.kz, <https://orcid.org/0009-0008-2079-3358>

Медетов Бекболат Жаксылыкович, PhD, қауымд. профессоры, «Радиотехника, электроника және телекоммуникация» кафедрасы, Л. Н. Гумилев атындағы Еуразия ұлттық университеті, Астана қ., 010008, Қазақстан Республикасы, e-mail: bm02@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0002-5594-8435>

Машрапова Ризагуль Мегданиятовна, PhD, қауым. профессор, Торайғыров университеті, Энергетика факультеті, Павлодар қ., 140008, Қазақстан Республикасы, e-mail: rizka1504@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0001-9509-5767>

Машрапов Бауыржан Ерболович, PhD, қауымд. профессор, Торайғыров университеті, Энергетика факультеті, Павлодар қ., 140008, Қазақстан Республикасы, e-mail: bokamashrapov@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0002-3018-4125>

Молдахметов Саят Сайранович, доцент, «Энергетика және радиоэлектроника» кафедрасы, Инженерлік және сандық технологиялар факультеті, М. Қозыбаев атындағы Солтүстік Қазақстан университеті, Петропавл қ., 150000, Қазақстан Республикасы, e-mail: ssmoldahmetov@ku.edu.kz, <https://orcid.org/0000-0003-2432-7983>

Нұрмағанбетова Гүлім Сахитовна, PhD, қауымд. профессор м. а., С. Сейфуллин атындағы Қазақ агротехникалық зерттеу университеті, Астана қ., 010000 Қазақстан Республикасы, e-mail: g_sahitovna@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0002-9529-2477>

Медетов Бекболат Жаксылыкович, PhD, «Радиотехника, электроника және телекоммуникация» кафедрасы, қауымд. профессоры, Л. Н. Гумилев атындағы Еуразия ұлттық университеті Астана қ., 010008, Қазақстан Республикасы, e-mail: bm02@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0002-5594-8435>

Мәдениет Елубай, химия ғылымдарының кандидаты, профессор, Жаратылыстану факультетінің деканы, Торайғыров университеті, Павлодар қ., 140008, Қазақстан Республикасы, Humboldt-Innovation GmbH, Берлин, 10115, Германия, yelubay.m@tou.edu.kz <https://orcid.org/0000-0002-6209-5215>

Торғаев Талғат Сақтағанұлы, инженер-механик, Қорқыт Ата атындағы Қызылорда университеті, Инженерлі-технологиялық институты, Қызылорда қ., 020000, Қазақстан Республикасы, e-mail: ulan_alikhan@mail.ru, <https://orcid.org/0009-0006-9048-7546>

Меирбекова Оксана Даировна, аға оқытушы, Қожа Ақмет Ясауи атындағы Халықаралық қазақ-түрік университеті, Түркістан қ., 161200,

Қазақстан Республикасы, e-mail: oksana_120183@mail.ru, <https://orcid.org/0000-00030949-1443>

Мұзапаров Дәурен Тоқжанұлы, «Жылу энергетика» мамандығының докторанты, Торайғыров университеті, Павлодар қ. 140000, Қазақстан Республикасы, e-mail: mdt07@bk.ru, <https://orcid.org/0009-0009-0733-2343>

Мехтиев Али Джаванширович, техника ғылымдарының кандидаты, қауымд.профессор, Әбілқас Сағынов атындағы Қарағанды техникалық университеті кеңес мүшесі, ғылыми жұмыстар жөніндегі проректоры, Қарағанды, 100008, Қазақстан Республикасы, e-mail: barton.kz@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0002-2633-3976>

Мехтиев Руслан Алиұлы, Ғылыми қызметкер, Электр жабдықтарын пайдалану, кафедрасы, Сейфуллин атындағы Қазақ агротехникалық зерттеу университеті, Астана қ., 010000, Қазақстан Республикасы, e-mail: ruslanmekhtiyev@gmail.com, <https://orcid.org/0000-0001-5416-3444>

Мерғалимова Алмагуль Қайырбергеновна, PhD, қауымд. профессор, энергетика факультеті, Сейфуллин атындағы Қазақ агротехникалық зерттеу университеті, Астана қ., 010000, Қазақстан Республикасы, e-mail: almagul_mergalimova@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0002-5990-8182>

Нешина Елена Геннадьевна, техника ғылымдарының кандидаты, «Энергетикалық жүйелер» кафедрасы, меңгерушісі, «Әбілқас Сағынов атындағы Қарағанды техникалық университеті, Қарағанды қ. , 100027, Қазақстан Республикасы, e-mail: 1_neg@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0002-8973-295>

Никифоров Александр Степанович, техника ғылымдарының докторы, профессор, «Жылуэнергетика» кафедрасы, Торайғыров университеті, Павлодар қ., 140008, Қазақстан Республикасы, e-mail: aleke4599@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0002-6977-0957>

Нұрғали Аян Ералиұлы, «Жаңартылатын энергетиканың заманауи және инновациялық технологиялары» мамандығы бойынша магистрант, Жаңғыртылатын энергия көздері және электрмен қамтамасыз ету кафедрасы, Ғұмарбек Дәукеев атындағы Алматы энергетика және байланыс университеті, Алматы қ. 050043, Қазақстан Республикасы e-mail: a.nurgali@aes.kz, <https://orcid.org/0009-0000-3678-9099>

Нұрқасен Нұрбек Асанұлы, «Электр энергетика» мамандығы бойынша магистрант, Ғұмарбек Дәукеев атындағы Алматы энергетика және байланыс университеті, «Жаңғыртылатын энергия көздері және электрмен қамтамасыз ету кафедрасы, Алматы қ., 050013, Қазақстан Республикасы e-mail: nurbeknurkasenov@gmail.com, <https://orcid.org/0009-0007-9315-7312>

Нусупов Ержан, Телекоммуникация» мамандығы бойынша докторант, Электроника, телекоммуникациялар және ғарыштық технологиялар кафедрасы,

Автоматика және ақпараттық технологиялар институты, Қ. И. Сәтбаев атындағы Қазақ ұлттық техникалық зерттеу университеті, Алматы қ., 050013, Қазақстан Республикасы, e-mail: nussupov.erzhan@gmail.com, <https://orcid.org/0009-0008-5118-3683>

Наубетов Дәулет Абатұлы, техника ғылымдарының магистрі, аға оқытушы, Ғұмарбек Дәукеев атындағы Алматы энергетика және байланыс университеті, Ақпараттық технологиялар институты, «Киберқауіпсіздік» кафедрасы, Алматы қ., 050013, Қазақстан Республикасы, аға ғылыми қызметкер, Қ. И. Сәтбаев атындағы Қазақ ұлттық зерттеу техникалық университеті, Алматы қ., 050013, Қазақстан Республикасы, e-mail: daul_naubetov@gmail.com, <https://orcid.org/0000-0002-0323-0675>

Олейник Сергей Иванович, техника ғылымдарының кандидаты, Директоры, «ЭНЭКО» ЖШС, Павлодар қ. , 140002, Қазақстан Республикасы, e-mail: olejnik_pte@mail.ru

Олжабаева Қарлығаш Серікқызы, PhD, Ғұмарбек Дәукеев атындағы Алматы энергетика және байланыс университеті, Жылу Энергетикалық қондырғылар» кафедрасы, Алматы қ., 050013, Қазақстан Республикасы, e-mail: k.olzhabayeva@aes.kz, <https://orcid.org/0000-0002-2018-8835>

Расмухаметова Айнуր Серікқызы, PhD, қауымд.профессор, Ғұмарбек Дәукеев атындағы Алматы энергетика және байланыс университеті, Жаңғыртылатын энергия көздері және электрмен қамтамасыз ету кафедрасы, Алматы қ., 050013 Қазақстан Республикасы e-mail: a.rasmukhametova@aes.kz, <https://orcid.org/0000-0003-1376-6112>

Сивякова Галина Александровна,техника ғылымдарының кандидаты, доцент, Энергетика, көлік және басқару жүйелері факультеті, Қарағанды индустриялық университеті, Теміртау қ., 101400, Қазақстан Республикасы, e-mail: g.sivyakova@ttu.edu.kz, <https://orcid.org/0000-0001-7689-8433>

Смагулова Каршига Канатовна, PhD, доцент Сағынов атындағы Қарағанды мемлекеттік техникалық университеті, Қарағанды қ. 100027, Қазақстан Республикасы, e-mail: smagulovakk83@gmail.com, <https://orcid.org/0000-0001-6834-8490>

Сапарғалиева Айгерім Нұржанқызы, «Жылу энергетика» мамандығының докторанты, Энергетика факультеті, С. Сефуллин атындағы агротехникалық зерттеу университеті, Астана қ., 010000, Қазақстан Республикасы, e-mail: ms.lady.aigerima@bk.ru, <https://orcid.org/0009-0009-4781-2528>

Сафарбаков Алексей Альбертович, техника ғылымдарының кандидаты, «Павлодартехэнерго» ЖШС Директоры, Павлодар қ., 140002, Қазақстан Республикасы, e-mail: safarbakov@mail.ru,

Сағындық Әйгерім Бекенқызы, PhD, постдокторант Торайғыров Университеті, Энергетика факультеті, Павлодар, 140008, Қазақстан Республикасы, e-mail: aiko_90@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0003-0376-2150>

Самошкин Дмитрий Андреевич, Ғылыми қызметкер, Новосибирск мемлекеттік университеті, Новосибирск қ. Ресей, Новосибирск қ., 630090, Ресей Федерациясы, d.a.samoshkin@gmail.com, <https://orcid.org/0000-0002-7074-7762>

Сарсикеев Ермек Жасланұлы, PhD, қауымд. профессор, Сейфуллин атындағы Қазақ агротехникалық зерттеу университеті, Электр жабдықтарын пайдалану, кафедрасы, Астана қ., 010000, Қазақстан Республикасы, e-mail: sarsikeev.ermek@yandex.ru, <https://orcid.org/0000-0002-7209-5024>

Сейтжаппаров Нұрсұлтан Құрманғазыұлы, D098 «Жылуэнергетика» білім беру бағдарламасы бойынша докторант, Көлік-энергетика факультеті, Л. Н. Гумилев атындағы Еуразия ұлттық университеті, Астана қ. 010000 Қазақстан, e-mail: nurs.zhidebay@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0002-7624-1367>

Султангузин Ильдар Айдарович, техника ғылымдарының докторы, «МЭИ» Ұлттық зерттеу университетінің профессоры, Мәскеу қ., 111250, Ресей Федерациясы, e-mail: SultanguzinIA@mpei.ru, <https://orcid.org/0000-0001-6324-5214>

Сулейменов Канат Балтабаевич, «Innovation Technology Center» ЖШС техникалық директоры, Астана қ., 010000, Қазақстан Республикасы, e-mail: katu_skb61@mail.ru, <https://orcid.org/0009-0005-6283-9164>

Сәбиболда Әкежан Мұратұлы, PhD, аға оқытушы, ғылыми қызметкер, электроника, телекоммуникациялар және ғарыштық технологиялар кафедрасы, Академик Ө. А. Жолдасбеков атындағы Механика және машинатану институты, Қ. И. Сәтбаев атындағы Қазақ ұлттық зерттеу техникалық университеті, Алматы қ., 050013, 050010, Қазақстан Республикасы, e-mail: sabibolda98@gmail.com, <https://orcid.org/0000-0002-1186-7940>

Смайлов Нұржігіт Құралбайұлы, PhD, профессор, ғылыми қызметкер, «Электроника, телекоммуникациялар және ғарыштық технологиялар кафедрасы, Satbayev University, Академик Ө. А. Жолдасбеков атындағы Механика және машинатану институты, Автоматика және ақпараттық технологиялар институты, Алматы қ., 050013, 050010, Қазақстан Республикасы, e-mail: n.smailov@satbayev.universit, <https://orcid.org/0000-0002-7264-2390>

Сарсенбаев Ерлан Алиаскарович, PhD, қауымд. профессор, меңгеруші, Энергетика кафедрасы, Қ. И. Сәтпаев атындағы Қазақ ұлттық зерттеу техникалық университеті, Алматы қ., 050013, Республика, e-mail: sarsenbayev@satbayev.university, <https://orcid.org/0000-0002-8887-1171>

Таткеева Галина Галимзяновна, техника ғылымдарының докторы, доцент, «Электрмен жабдықтау» кафедрасы, С. Сейфуллин атындағы Қазақ агротехникалық зерттеу университеті, Астана қ., Қазақстан Республикасы, e-mail: tatkееva@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0001-9518-4567>

Тытук Валерий Константинович, техника ғылымдарының докторы, профессор, Электротехника факультеті, Кривой Рог ұлттық университеті, Кривой Рог қ., 50002, Украина, e-mail: tytiuk@knu.edu.ua, <https://orcid.org/0000-0003-1077-3288>

Туманов Мусакул Елегенович, техника ғылымдарының кандидаты, Жылу энергетика және физика доценты, Жылу энергетикасы және басқару жүйелері институты, Г. Даукеев атындағы Алматы энергетика және байланыс университеті, Алматы қ., 050000, Қазақстан Республикасы, e-mail: m.tumanov@aes.kz, <https://orcid.org/0000-0002-0093-719X>

Ташлыкова Раиса Владимировна, «СевКазЭнергоПром» ҒӨК ЖШС бас директорының кеңесшісі, Қазақстан Республикасы, Павлодар қ., 140006, e-mail: r.tashlykova@skep.kz, <https://orcid.org/0009-0004-7285-9305>

Түлебаева Жанар Амангельдиновна, «Жылуэнергетика» мамандығы бойынша докторант, Энергетика факультеті, Торайғыров университеті, Павлодар қ., 140008, Қазақстан Республикасы, e-mail: tulebaeva.zhanar@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0002-4289-9777>

Талипов Олжас Манарбекұлы, PhD, қауымд. профессор (доцент), энергетика факультетінің деканы, Торайғыров университеті, Павлодар, 140000, Қазақстан Республикасы, e-mail: talipov1980@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0002-8355-1769>

Тасболат Ғалымжан Жұмабекұлы, докторант, Л. Н. Гумилев атындағы Еуразия ұлттық университеті, Астана қ., 010008, Қазақстан Республикасы, e-mail: tasbolat_gzh@enu.kz, <https://orcid.org/00000002-3790-2097>

Таштай Ерлан, техника ғылымдарының кандидаты, электроника, телекоммуникациялар және ғарыштық технологиялар кафедрасы, меңгерушісі, Қ. И. Сәтбаев атындағы Қазақ ұлттық зерттеу техникалық университеті, Алматы қ., 050013, Қазақстан Республикасы, e-mail: y.tashstay@satbayev.university, <https://orcid.org/0000-0002-0809-537X>

Умышева Мадина Маратовна, докторант, техника ғылымдарының маистранты Қ. И. Сәтпаев атындағы Қазақ ұлттық зерттеу техникалық университеті, Алматы қ., 050013, Қазақстан Республикасы. e-mail: umysheva@satbayev.university, <https://orcid.org/0009-0009-4748-611X>

Умышев Диас Райбекович, профессор, PhD, қауымд. проф. Қ. И. Сәтпаев атындағы Қазақ ұлттық зерттеу техникалық университеті, Алматы қ. 050013, Қазақстан Республикасы, e-mail: d.umyshev@satbayev.university, <https://orcid.org/0000-0001-6834-1635>

Фаурат Алина Александровна, География және туризм кафедрасы, қауымд. профессор, Торайғыров университеті, Павлодар қ., 140000, Қазақстан Республикасы, e-mail: alina03.09@mail.ru

Цэрэндорж Цэцгээ, «МЭИ» Ұлттық зерттеу университеті, аспирант, Мәскеу қ., 111250, Ресей Федерациясы, e-mail: TserendorzhT@mpei.ru, <https://orcid.org/0009-0009-4827-7221>

Шаймерденова Рымтай Төкенқызы, Сейфуллин атындағы Қазақ агротехникалық зерттеу университеті, Электр жабдықтарын пайдалану кафедрасы, Астана қ., 010000, Қазақстан Республикасы, e-mail: [rima71@mail.ru](mailto:rима71@mail.ru), <https://orcid.org/0000-0002-0241-6961>

Ыбрай Сұлтан Барлымбайұлы, аға оқытушысы С. Сейфуллин атындағы Қазақ агротехникалық зерттеу университеті, Жылуэнергетика кафедрасы, Астана, 010011, Қазақстан Республикасы, e-mail: sultanybray@gmail.com, <https://orcid.org/0000-0002-5262-2149>

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ

Айкимбаева Дина Даулетовна, магистр, преподаватель специальных дисциплин, ГКП на ПХВ «Высший колледж транспорта и коммуникаций» Астана, Республика Казахстан, e-mail: darkhan_s05@mail.ru, <https://orcid.org/0009-0005-6182-9220>

Айткалиева Гульзат Сляшевна, PhD, ассоц. профессор, Институт геологии и нефтегазового дела, Satbayev University, г. Алматы, 050013, Республика Казахстан, e-mail: g.aitkaliyeva@satbayev.university, <https://orcid.org/0000-0001-9872-6317>

Арипова Назгуль Михайловна, ассоц. профессор, кафедра «Теплоэнергетика» Торайғыров университет, г. Павлодар, 140003, Республика Казахстан, e-mail: nazgul_2010@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0003-2760-8617>

Агажанов Алибек Шаяхметович, кандидат физико-математических наук, научный сотрудник г. Новосибирск, Россия, Институт теплофизики имени, 630090, Российская Федерация, e-mail: scousekz@gmail.com, <https://orcid.org/0000-0003-0461-7211>

Айтмагамбетов Алтай Зуфарович, кандидат технических наук, профессор, кафедра «Радиотехника, электроника и телекоммуникации, Международный университет Информационных технологий г. Алматы, 050040, Республика Казахстан; e-mail: a.aitmagambetov@iitu.edu.kz, <https://orcid.org/0000-0002-7808-5273>

Анарбаев Алибек Ерсанович, стр. преподаватель, Факультет энергетике, Торайғыров университет, г. Павлодар, 140008, Республика Казахстан, e-mail: alibek_anarbaev@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0001-6890-8005>

Абдрахманов Бауыржан Тендикович, старший преподаватель, Факультет энергетике, Торайғыров университет, г. Павлодар, 140008, Республика Казахстан, e-mail: bauyrymten@mail.ru, <https://orcid.org/0009-0002-7817-1275>

Аябаев Асыл Серикбаевич, магистрант, Факультет энергетике, Торайғыров университет, г. Павлодар, 140008, Республика Казахстан, e-mail: ayabayev@bk.ru, <https://orcid.org/0009-0006-1515-1233>

Айтмагамбетов Алтай Зуфарович, кандидат технических наук, профессор, кафедра «Радиотехника, электроника и телекоммуникации», Международный Университет Информационных Технологий. г. Алматы, 050040, Республика Казахстан, e-mail: a.aitmagambetov@iitu.edu.kz, <https://orcid.org/0000-0002-7808-5273>

Алихан Улан Батырханұлы, магистрант, специальность «Электроэнергетика (Возобновляемая энергетика)», Инженерно-технологический институт, Кызылординский университет имени Коркыт

Ата, Кызылорда, 020000, Республика Казахстан, e-mail: alikhan.ulan@mail.ru, <https://orcid.org/0009-0002-6571-0348>

Атякшева Александра Владимировна, доцент, кафедра теплоэнергетики Казахского исследовательского сельскохозяйственного университета имени С. Сейфуллина, г. Астана, 010011, Республика Казахстан, e-mail: sahsa77@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0003-2523-3890>

Алимгазин Алтай Шурумбаевич, доктор технических наук, профессор, Евразийский национальный университет имени Л. Н. Гумилева, г. Астана, 010008, Республика Казахстан, e-mail: alimgazin_altai@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0002-5848-1842>

Батырбек Әлібек Есімбекұлы, докторант по образовательной программе «Автоматизация и управление», Факультет энергетики, транспорта и систем управления, Карагандинский индустриальный университет, г. Темиртау, 101400, Республика Казахстан, e-mail: alibek_batyrbek@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0002-3369-6804>

Байжұма Жандос Ескендірұлы, PhD, и.о. доцент, Казахский национальный университет имени аль-Фараби, г. Алматы 050000-050063, Республика Казахстан, e-mail: zhan-dos.baizhuma@kaznu.kz, <https://orcid.org/0000-0003-3692-2245>

Бердибеков Абдисаттар Опабекович, PhD студент, Казахский национальный исследовательский технический университет имени К. И. Сатпаева (КазНИТУ), г. Алматы, 050013, Республика Казахстан, e-mail: a.berdibekov@satbayev.university, <https://orcid.org/0000-0001-5943-432X>

Бекбаев Амангельды Бекбаевич, доктор технических наук, профессор, Казахский национальный исследовательский технический университет имени К. И. Сатпаева, г. Алматы, 050000, Республика Казахстан, e-mail: a.bekbayev@satbayev.university.kz, [tps://orcid.org/0000-0003-3520-1710](https://orcid.org/0000-0003-3520-1710)

Бекболатова Жаннат Кайыровна, PhD, ассоц. профессор, Казахский национальный исследовательский технический университет имени К. И. Сатпаева, г. Алматы, 050000, Республика Казахстан, e-mail: zh.bekbolatova@satbayev.university, <https://orcid.org/0000-0002-8219-6400>

Белый Александр Владимирович, кандидат географических наук, профессор, кафедра «География и туризм», Торайғыров университет, г. Астана, 010000, Республика Казахстан, e-mail: alexander.belyi@mail.ru

Байдилдина Айжан Толеубековна, PhD, ассоц. профессор, «Восточно-Казахстанский технический университет имени Д. Серикбаева, г. Усть-Каменогорск, 070016, Республика Казахстан, e-mail: azhparova@edu.ektu.kz, <https://orcid.org/0000-0002-3793-5817>

Барукин Александр Сергеевич, PhD, профессор, Факультет энергетики, Торайғыров университет, г. Павлодар, 140008, Республика Казахстан. e-mail: alexbarukin@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0002-5969-4030>

Байбейсенова Қымбат Берікқанқызы, магистрант, 1 курс, по образовательной программе 7М08705, Энергообеспечение и автоматизация сельского хозяйства Казахский агротехнический исследовательский университет имени С. Сейфуллина, г. Астана, 010000, Республика Казахстан, e-mail: baibeisenovakima@gmail.com, <https://orcid.org/0009-0007-8482-8604>

Бекишева Жанна Таукеновна, м.т.н., стар. преподаватель, кафедра, «Теплоэнергетика», энергетический факультет, Казахский агротехнический исследовательский университет имени С.Сейфуллина, г. Астана, 010000, Республика Казахстан, e-mail: Zhanna_1986_23@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0001-9224-2426>

Габдулов Асет Уралбаевич, докторант, специальность Теплоэнергетика», Факультет энергетики, Торайғыров университет, г. Павлодар, 140008, Республика Казахстан, e-mail: gabdulov25@mail.ru, <https://orcid.org/0009-0001-3266-8270>

Достияров Абай Мухамедиярович, доктор технических наук, профессор института теплоэнергетики и систем управления, кафедра «Теплоэнергетика и физика», Алматинский университет энергетики и связи имени Г.Даукеева, г. Алматы, 050000, Республика Казахстан, e-mail: a.m.dost1951@gmail.com, <https://orcid.org/0000-0002-6559-8598>

Джанарғалиева Малика Руслановна, Магистрант, кафедра «География и туризм» по направлению «Туризм», Торайғыров университет, г. Павлодар, 140000, Республика Казахстан, e-mail: malika_28-01@mail.ru

Дүйсембаева Гульнур Сейтхановна, докторант, курса 1, специальность 8D07103 – Теплоэнергетика, Восточно-Казахстанский технический университет имени Д. Серикбаева, г. Усть-Каменогорск, 070016, Республика Казахстан, e-mail: gdyusembaeva80@mail.ru, <https://orcid.org/0009-0003-5059-8223>

Дайнеко Евгения Александровна, Phd, Директор Института автоматизации и информационных технологий, Satbayev University, ассоц. профессор, кафедра «Компьютерная инженерия», Международный университет Информационных технологий, г. Алматы, 050040, Республика Казахстан, e-mail: y.daineko@iitu.edu.kz, <https://orcid.org/0000-0001-6581-2622>

Динмуханбетова Айгуль Жумагельдыевна, PhD, ассоц. профессор, Торайғыров университет, Факультет энергетики, Павлодар, 140008, Республика Казахстан, e-mail: ardi100909@mail.ru, <https://orcid.org/0009-0005-8325-9724>

Бергузин Асхат Нурланович, PhD, профессор, Торайғыров университет, г. Павлодар, 140008, Республика Казахстан, e-mail: askhat_berguzinov@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0001-6954-8259>

Есимова Динара Даутовна, кандидат педагогических наук, зав. кафедрой «География и туризм», Торайғыров университет, г. Павлодар, 140000, Республика Казахстан, e-mail: dika-73@mail.ru

Есім Аяна Қазбекқызы, докторант по направлению «Сфера обслуживания», ЕНУ имени Л. Н. Гумилева, г. Астана, 010000, Республика Казахстан, e-mail: ayana_esimova99@mail.ru

Есмаханова Лаура Нурлановна, PhD, кафедра «Автоматизация и телекоммуникация» Технологический факультет, Таразский университет имени М. Х. Дулати, г. Тараз, 080000, Республика Казахстан, e-mail: laura060780@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0002-3308-9676>

Жуматова Асель Акановна, кандидат технических наук, ассоц. профессор, Казахский национальный исследовательский технический университет имени К. И. Сатпаева, г. Алматы, 050000, Республика Казахстан, e-mail: a.zhumatova@satbayev.university.kz, <https://orcid.org/0000-0001-9606-7557>

Жалмагамбетова Ултуар Каирбулатовна, PhD, профессор кафедры «Теплоэнергетики», факультет Энергетики, Республика Казахстан, г. Павлодар, 140008, ultuara@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0002-2261-2222>

Жантлесова Асемгуль Бейсембаевна, PhD, и.о. ассоц. профессор (доцент), Казахский государственный университет имени С. Сейфуллина, Республика Казахстан, г. Астана, 010008, e-mail: acbizh@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0003-3730-0579>

Жансериковна Акнур, магистр технических наук, Инженерно-технологический институт, Кызылординский университет имени Коркыт Ата, г. Кызылорда, 020000, Республики Казахстан, e-mail: zhanserikyzy@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0002-6164-6775>

Ильясова Гулжан, Оспанбековна, докторант, специальность «Теплоэнергетика» Казахский национальный университет имени аль-Фараби, г. Алматы, 050000-050063, Республика Казахстан, e-mail: yliysova_gulzhan@mail.ru, <https://orcid.org/0009-0008-6205-4959>

Иманаев Марат Шамильевич, Директор ТОО «Павлодарские тепловые сети», г. Павлодар, 140000, Республика Казахстан, e-mail: M.Imanaev@pavlodarenergo.kz

Исабекова Бибигуль Бейсембаевна, PhD, ассоц. профессор (доцент), Факультет Computer science, Торайғыров университет, г. Павлодар, 140008, еспублика Казахстан, e-mail: asbizh@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, <https://orcid.org/0000-0003-3980-1617>

Исаев Валерий Львович, кандидат технических наук, кафедра «Энергетические системы», Карагандинский Технический университет имени Абылкаса Сагинова г. Караганда, 100027, Республика азахстан, e-mail: isaevvalerie@gmail.com, <https://orcid.org/0000-0003-1187-4638>

Исмаилова Айғаным Бахтиярқызы, PhD, ассоц. профессор, Международная образовательная корпорация, Казахская головная архитектурно строительная академия, г. Алматы, 050043, Республика Казахстан, e-mail: i-smile@bk.ru, <https://orcid.org/0000-0002-4234-0615>

Калытка Валерий Александрович, PhD, ассоц. профессор, кафедра «Энергетические системы», Карагандинский технический университет имени абылкаса Сагинова , г. Караганда, 100027, Республика Казахстан, e-mail: kalytk@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0002-3232-1285>

Исенов Султанбек Сансызбаевич, кандидат технических наук, ассоц. профессор, Казахский агротехнический исследовательский университет имени С. Сейфуллина, г. Астана, 010000, Республика Казахстан, e-mail: issenov.sultanbek@gmail.com, <https://orcid.org/0000-0003-4576-4621>

Камарова Сауле Нуртазаевна, Phd, доцент кафедра «Энергетика», Карагандинский индустриальный университет, Карагандинская область, г. Темиртау, 101400, Республика Казахстан, e-mail: cfekt.rfvfhjdf@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0001-8464-7204>

Каласов Нұрдәулет Болатұлы, PhD, и.о. доцент Казахский национальный университет имени аль-Фараби, г. Алматы, 050000-050063, Республика Казахстан, e-mail: kalasov.nurdaulet@gmail.com, <https://orcid.org/0000-0003-3709-5544>

Катранова Газиза Сериковна, PhD, Компания British American Tobacco, г. Алматы, 050000, Республика Казахстан, e-mail: gaziza.katranova@mail.com, <https://orcid.org/0000-0003-0688-5324>

Карманов Амангельды Ерболович, PhD, заведующий кафедрой «Теплоэнергетика», Торайғыров университет, г. Павлодар, 140003, Республика Казахстан, e-mail: aman270685@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0001-7512-0275>

Канапинов Медет Серикович, PhD, стар.преподаватель, Восточно-Казахстанский технический университет имени Д. Серикбаева, г. Усть-Каменогорск, 070016, Республика Казахстан, e-mail: mega_bum_90@mail.ru, <https://orcid.org/0009-0002-6249-2373>

Кулакаева Айгуль Ергалиевна, Phd, ассоц.профессор кафедра «Радиотехника, электроника и телекоммуникации», Международный

Университет Информационных Технологий, г. Алматы, 050040, Республика Казахстан, e-mail: a.kulakayeva@iitu.edu.kz, <https://orcid.org/0000-0002-0143-085X>

Кислов Александр Петрович, кандидат технических наук, доцент, профессор, Факультет энергетики, Торайғыров университет, г. Павлодар, 140008, Республика Казахстан, e-mail: kislovpsu@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0003-4816-8008>

Кулакаева Айгуль Ергалиевна Phd, ассоц. профессор кафедра «Радиотехника, электроника и телекоммуникации», Международный Университет Информационных Технологий, г. Алматы, 050040, Республика Казахстан, e-mail: a.kulakayeva@iitu.edu.kz, <https://orcid.org/0000-0002-0143-085X>

Кожаметова Багдат Абдурашидовна, Ассистент-профессор, кафедра «Радиотехника, электроника и телекоммуникации» Международного Университета Информационных Технологий, г. Алматы, 050040, Республика Казахстан, e-mail: kozhahmetova.ba@gmail.com, <https://orcid.org/0000-0002-9566-3629>

Кушанова Динара Казбековна, магистрант, специальность «Химическая инженерия углеводородных соединений, Институт геологии и нефтегазового дела, Satbayev University, г. Алматы, 050013, Республика Казахстан, e-mail: 88dilya@gmail.com, <https://orcid.org/0009-0002-3058-7634.8-778-962-81-62>

Култан Исламбек Берикович, магистр технических наук, Кызылординский университет имени Коркыт Ата, Инженерно-технологический институт, г. Кызылорда, 020000, Республики Казахстан e-mail: islambek.kultan@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0001-9485-0425>

Кудайберген Зулхарнайын Русланулы, студент, Кызылординский университет имени Коркыт Ата, Инженерно-технологический институт, г. Кызылорда, 020000, Республики Казахстан, e-mail: kudaybergenzulhamay2007@gmail.com, <https://orcid.org/0009-0006-6234-0520>

Калтаев Абдулла Габдылманулы, Phd, ассоц. профессор (доцент), Торайғыров университет, г. Павлодар, 140008, Республика Казахстан, e-mail: abdulla911@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0003-1684-3347>

Казыбек Жанеля Ганикызы, магистрант, специальность «Электроэнергетика», «Алматинский университет энергетики и связи имени Гумарбека Даукеева», Кафедра «Электроснабжение и возобновляемые источники энергии», г. Алматы, 05001, Республика Казахстан, e-mail: zh.kazybek@aes.kz, <https://orcid.org/0009-0003-0230-8308>

Куатова Анар Сталовна, Казахский агротехнический исследовательский университет имени С. Сейфуллина, кафедра Электроснабжение, г. Астана, 010000, Республика Казахстан, e-mail: anarkuatova2019@gmail.com, <https://orcid.org/0000-0001-8972-1346>

Қаласов Нұрдаулет Болатұлы, Phd, и.о. доцент, Казахский национальный университет имени аль-Фараби, г. Алматы, 050000-050063, Республика Казахстан, kalasov.nurdaulet@gmail.com, <https://orcid.org/0000-0003-3709-5544>

Ларкин Виктор Александрович, заместитель генерального директора по производству ТОО НПФ «СевКазЭнергоПром», Республика Казахстан, г. Павлодар, 140006, e-mail: v.larkin@skep.kz, <https://orcid.org/0009-0008-2079-3358>

Медетов Бекболат Жаксылыкович, Phd, ассоц. профессор, кафедра «Радиотехника, электроника и телекоммуникации», Евразийский национальный университет имени Л. Н. Гумилева, г. Астана, 010008, Республика Казахстан, e-mail: bm02@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0002-5594-8435>

Машрапова Ризагуль Мегданиятовна, Phd, ассоц. профессор, Торайғыров университеті, Факультет энергетики, г. Павлодар, 140008, Республика Казахстан, e-mail: rizka1504@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0001-9509-5767>

Машрапов Бауыржан Ерболович, Phd, ассоц. ирированный профессор, Факультет энергетики, Торайғыров университет, г. Павлодар, 140008, Республика Казахстан, e-mail: bokamashrapov@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0002-3018-4125>

Молдахметов Саят Сайранович, доцент, кафедра «Энергетика и радиоэлектроника», Факультет инженерии и цифровых технологий, Северо-Казахстанский университет имени М. Козыбаева, г. Петропавловск, 150000, Республика Казахстан, e-mail: ssmoldahmetov@ku.edu.kz, <https://orcid.org/0000-0003-2432-7983>

Нурмаганбетова Гулим Сахитовна, Phd, и. о. ассоц. профессора, Казахский агротехнический исследовательский университет имени С. Сейфуллина, г. Астана, 010000, Республика Казахстан, e-mail: g_sahitovna@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0002-9529-2477>

Медетов Бекболат Жаксылыкович, Phd, ассоц. профессор кафедра «Радиотехника, электроника и телекоммуникации», Евразийский национальный университет имени Л. Н. Гумилева, г. Астана, 010008, Республика Казахстан, e-mail: bm02@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0002-5594-8435>

Мадениет Елубай, кандидат химических наук, Декан факультета естественных наук, профессор, Торайғыров университет, г. Павлодар, 140008, Республика Казахстан, Humboldt-Innovation GmbH, г. Берлин, 10115, Германия e-mail: yelubay.m@tou.edu.kz, <https://orcid.org/0000-0002-6209-5215>

Торгаев Талгат Сактаганович, инженер-механик, магистр технических наук, Кызылординский университет имени КORKыт Ата, Инженерно-технологический институт, г. Кызылорда, 020000, Республика Казахстан, e-mail: ulan_alikhan@mail.ru, <https://orcid.org/0009-0006-9048-7546>

Меирбекова Оксана Даировна, стар. преподаватель, Международный казахско-турецкий университет имени Хожди Ахмеда Ясави, г. Туркестан, 161200, Республика Казахстан, e-mail: oksana_120183@mail.ru, <https://orcid.org/0000-00030949-1443>

Музапаров Даурен Токжанович, докторант, специальность «Теплоэнергетика», Торайғыров университет, г. Павлодар, 140000, Республика Казахстан, e-mail: mdt07@bk.ru, <https://orcid.org/0009-0009-0733-2343>

Мехтиев Али Джаванширович, кандидат технических наук, ассоц. профессор, Карагандиский технический университет имени Абылкаса Сагинова, Член-Правления проректор по научной работе, г. Караганда, 100008, Республика Казахстан, e-mail: barton.kz@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0002-2633-3976>

Мехтиев Руслан Алиевич, Научный сотрудник Казахский агротехнический исследовательский университет имени С. Сейфуллина, кафедра эксплуатации электро оборудования г. Астана, 010000, Республика Казахстан, e-mail: ruslanmekhtiyev@gmail.com, <https://orcid.org/0000-0001-5416-3444>

Мергалимова Алмагуль Каирбергеновна, PhD, ассоц. профессор, энергетический факультет, Казахский агротехнический исследовательский университет имени С. Сейфуллина, г. Астана, 010000, Республика Казахстан, e-mail: almagul_mergalimova@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0002-5990-8182>

Нешина Елена Геннадьевна, кандидат технических наук, заведующий кафедрой «Энергетические системы» Карагандинский, Технический университет имени Абылкаса Сагинова, г. Караганда, 100027, Республика Казахстан, <https://orcid.org/0000-0002-8973-2958>, 1_neg@mail.ru

Никифоров Александр Степанович, доктор технических наук, профессор, кафедра «Теплоэнергетика», Торайғыров университет, г. Павлодар, 140003, Республика Казахстан, e-mail: aleke4599@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0002-6977-0957>

Нургали Аян Ералиулы, магистрант, специальность «Современные инновационные технологии возобновляемой энергетики», «Алматинский университет энергетики и связи имени Гумарбека Даукеева, Кафедра «Электроснабжение и возобновляемые источники энергии», г. Алматы, 050043, Республика Казахстан, e-mail: a.nurgali@aes.kz, <https://orcid.org/0009-0000-3678-9099>

Нуркасен Нурбек Асанулы, магистрант, специальность «Электроэнергетика», «Алматинский университет энергетики и связи имени Гумарбека Даукеева», Кафедра «Электроснабжение и возобновляемые источники энергии», г. Алматы, 050013, Республика Казахстан, e-mail: nurbeknurkasenov@gmail.com, <https://orcid.org/0009-0007-9315-7312>

Нусупов Ержан, докторант, специальность «Телекоммуникация», Кафедра Электроники, телекоммуникации и космических технологий, Институт автоматизации и информационных технологий, Казахский национальный исследовательский технический университет имени К. И. Сатпаева, г. Алматы, 050013, Республика Казахстан, e-mail: nussupov.erzhan@gmail.com, <https://orcid.org/0009-0008-5118-3683>

Наубетов Дәулет Абатулы, старший научный сотрудник, магистр технических наук, старший преподаватель, Алматинский университет энергетики и связи имени Гумарбека Даукеева, Институт информационных технологий, кафедра «Кибербезопасность», Казахский национальный исследовательский технический университет имени К. И. Сатпаева, г. Алматы, 050013, Республика Казахстан e-mail: daul.naubetov@gmail.com, <https://orcid.org/0000-0002-0323-0675>

Олейник Сергей Иванович, кандидат технических наук, директор, ТОО «ЭНЭКО», г. Павлодар, 140002, Республика Казахстан, e-mail: olejnik_pte@mail.ru

Олжабаева Карлыгаш Сериковна, PhD, Алматинский университет энергетики и связи имени Гумарбека Даукеева, Кафедра «Тепло энергетических установок, г. Алматы, 050013, Республика Казахстан, e-mail: k.olzhabayeva@aes.kz, <https://orcid.org/0000-0002-2018-8835>

Расмухаметова Айнур Сериковна, PhD, ассоц. профессор «Алматинский университет энергетики и связи имени Гумарбека Даукеева, Кафедра «Электроснабжение и возобновляемые источники энергии», г. Алматы, 050013, Республика Казахстан, e-mail: a.rasmukhametova@aes.kz, <https://orcid.org/0000-0003-1376-6112>

Сивякова Галина Александровна, кандидат технических наук, доцент, Факультет энергетики, транспорта и систем управления, Карагандинский индустриальный университет, г. Темиртау, 101400, Республика Казахстан, e-mail: g.sivyakova@ttu.edu.kz, <https://orcid.org/0000-0002-7364-630X>

Смагулова Каршига Канатовна, PhD, доцент Карагандинский государственный технический университет имени А. Сагинова, г. Караганда 100027, Республика Казахстан, e-mail: smagulovakk83@gmail.com, <https://orcid.org/0000-0001-6834-8490>

Сапаргалиева Айгерим Нуржановна, докторант, специальность «Теплоэнергетика», Казахский агротехнический исследовательский

университет имени С. Сейфуллина, Энергетический факультет, г. Астана, 010000, Республика Казахстан, e-mail: ms.lady.aigerima@bk.ru, <https://orcid.org/0009-0009-4781-2528>

Сафарбаков Алексей Альбертович, кандидат технических наук, Директор, ТОО «Павлодартехэнерго», г. Павлодар 140002, Республика Казахстан, e-mail: safarbakov@mail.ru

Сағындык Айгерим Бекенқызы, PhD, постдокторант Торайғыров университет, Факультет энергетика, г. Павлодар, 140008, Республика Казахстан, e-mail: aiko_90@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0003-0376-2150>

Самошкин Дмитрий Андреевич, научный сотрудник, Новосибирский государственный университет, г. Новосибирск, Россия, Новосибирский государственный университет, Новосибирск, 630090, Российская Федерация, e-mail: d.a.samoshkin@gmail.com, <https://orcid.org/0000-0002-7074-7762>

Сарсикеев Ермек Жасланович, PhD, ассоц. профессор Казахский агротехнический исследовательский университет имени С. Сейфуллина, кафедра эксплуатации электрооборудования, г. Астана, 010000, Республика Казахстан, e-mail: sarsikyev.ermek@yandex.ru, <https://orcid.org/0000-0002-7209-5024>

Сейтжаппаров Нұрсұлтан Құрманғазыұлы, докторант по образовательной программе D098 «Теплоэнергетика», транспортно-энергетический факультет, Евразийский национальный университет имени Л. Н. Гумилева, г. Астана 010000, Республика Казахстан, e-mail: nurs.zhidebay@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0002-7624-1367>

Султангузин Ильдар Айдарович, доктор технических наук, профессор Национального исследовательского университета "МЭИ", г. Москва, 11250, Российская Федерация, e-mail: SultanguzinIA@mpei.ru, <https://orcid.org/0000-0001-6324-5214>

Судейменов Канат Балтабаевич, технический директор ТОО «Innovation Technology Center», г. Астана, 010000, Республика Казахстан, e-mail: katu_skb61@mail.ru, <https://orcid.org/0009-0005-6283-9164>

Сабibolda Акежан Муратулы, PhD, старший преподаватель, научный сотрудник, кафедра электроники, телекоммуникаций и космических технологий, Казахский национальный исследовательский технический университет имени К. И. Сатпаева, г. Алматы, 050013, Республика Казахстан, Институт механики и машиноведения имени академика У. А. Джолдасбекова, г. Алматы, 050010, Республика Казахстан, e-mail: sabibolda98@gmail.com, <https://orcid.org/0000-0002-1186-7940>

Смайлов Нуржигит Куралбаевич, PhD, профессор кафедры «Электроника, телекоммуникации и космические технологии» Института автоматизации и информационных технологий, Satbayev University, г. Алматы,

050013, Республика Казахстан, Институт механики и машиноведения имени академика У. А. Джолдасбекова, г. Алматы, 050010, Республика Казахстан, e-mail: n.smailov@satbayev.university, <https://orcid.org/0000-0002-7264-2390>

Сарсенбаев Ерлан Алиаскарович, PhD, ассоц.проф. зав.каф. «Энергетика», Казахский национальный исследовательский технический университет имени К. И.Сатпаева, г. Алматы, 050013, Қазақстан Республикасы e-mail: y.sarsenbayev@satbayev.university, <https://orcid.org/0000-0002-8887-1171>

Таткеева Галина Галимзяновна, доктор технических наук, доцент, кафедра «Электроснабжение», Казахский агротехнический исследовательский университет имени С. Сейфуллина», г. Астана, Республика Казахстан, e-mail: tatkeeva@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0001-9518-4567>

Тытюк Валерий Константинович, доктор технических наук, профессор, Факультет электротехнический,Криворожский национальный университет, г. Кривой Рог, 50002, Украина, e-mail: tytiuk@knu.edu.ua, <https://orcid.org/0000-0003-1077-3288>

Туманов Мусакул Елегенович, кандидат технических наук, доцент института теплоэнергетики и систем управления, кафедра «Теплоэнергетика и физика», Алматинский университет энергетика и связи имени Г.Дукуева, г. Алматы, 050000, Республика Казахстан, e-mail: m.tumanov@aues.kz, <https://orcid.org/0000-0002-0093-719X>

Ташлыкова Раиса Владимировна, советник генерального директора ТОО НПФ «СевКазЭнергоПром», Республика Казахстан, г. Павлодар, 140006, e-mail: r.tashlykova@skep.kz, <https://orcid.org/0009-0004-7285-9305>

Тулбаева Жанар Амангельдиновна, докторант по специальности «Теплоэнергетика», Торайғыров университет, Факультет энергетика,г. Павлодар, 140008, Республика Казахстан, e-mail: tulebaeva.zhanar@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0002-4289-9777>

Талипов Олжас Манарбекович, PhD, ассоц. профессор (доцент), декан факультета энергетика, Торайғыров университет, г. Павлодар, 140000, Республика Казахстан, e-mail: talipov1980@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0002-8355-1769>

Тасболат Галымжан Жумабекулы, докторант, Евразийский национальный университет имени Л. Н. Гумилева, г. Астана, 010008, Республика Казахстан, e-mail: tasbolat_gzh@enu.kz, <https://orcid.org/00000002-3790-2097>

Таштай Ерлан, кандидат технических наук,заведующий кафедрой электроники, телекоммуникаций и космических технологий Казахского национального исследовательского технического университета имени К. И. Сатпаева, г. Алматы, 050013, Республика Казахстан, e-mail: y.tashtay@satbayev.university, <https://orcid.org/0000-0002-0809-537X>

Умышева Мадина Маратовна, докторант, м.т.н. Казахский национальный исследовательский технический университет имени К. И. Сатпаева, г. Алматы, 050013, Республика Казахстан. e-mail: umysheva@satbayev.university, <https://orcid.org/0009-0009-4748-611X>

Умышев Диас Райбекович, PhD, профессор, ассоц.проф. Казахский национальный исследовательский технический университет имени К. И. Сатпаева г. Алматы, 050013, Республика Казахстан, e-mail: d.umyshev@satbayev.university, <https://orcid.org/0000-0001-6834-1635>

Фаурат Алина Александровна, ассоц. профессор, кафедра «География и туризм», Торайғыров университет, г. Павлодар, 140000, Республика Казахстан, e-mail: alina03.09@mail.ru

Цэрэндорж Цэцгээ, аспирант Национального исследовательского университета "МЭИ", г. Москва, 111250, Российская Федерация, e-mail: TserendorzhT@mpei.ru, <https://orcid.org/0009-0009-4827-7221>

Шаймерденова Рымтай Токеновна, Казахский агротехнический исследовательский университет имени С. Сейфуллина, кафедра эксплуатации электрооборудования, г. Астана, 010000, Республика Казахстан, e-mail: rma71@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0002-0241-6961>

Ыбрай Султан Барлымбайулы, стар. преподаватель, кафедра теплоэнергетики Казахского аграрного исследовательского университета имени С. Сейфуллина, г. Астана, 010011, Республика Казахстан, e-mail: sultanybray@gmail.com, <https://orcid.org/0000-0002-5262-2149>

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ

Aikimbayeva Dina Dauletovna, master, teacher of special disciplines, MSE Higher College of Transport and Communications REM, Astana, Republic of Kazakhstan, e-mail: darkhan_s05@mail.ru, <https://orcid.org/0009-0005-6182-9220>

Aitkaliyeva Gulzat, PhD, Associated Professor, Institute of Geology and Oil & Gas Business, Satbayev University, Almaty, 050013, Republic of Kazakhstan, e-mail: g.aitkaliyeva@satbayev.university, <https://orcid.org/0000-0001-9872-6317>

Aripova Nazgul Mikhailovna, Associate Professor of the Department of Heat Power Engineering, Toraigyrov University, Pavlodar, 140003, Republic of Kazakhstan, e-mail: nazgul_2010@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0003-2760-8617>

Agazhanov Alibek, Candidate of Physical and Mathematical Sciences, Research Associate Kutateladze Institute of Thermal Physics, Novosibirsk, Russi, Kutateladze Institute of Thermal Physics, Novosibirsk, 630090, Russian Federation, e-mail: scousekz@gmail.com, <https://orcid.org/0000-0003-0461-7211>

Aitmagambetov Altay Zufarovich, Candidate of Technical Sciences, Professor of the Department of "Radio Engineering, Electronics and Telecommunications," International Information Technologies University, Almaty, 050040, Republic of Kazakhstan, e-mail: a.aitmagambetov@iitu.edu.kz. <https://orcid.org/0000-0002-7808-5273>

Anarbayev Alibek Yersainovich, senior teacher, Faculty of Energy, Toraigyrov University, Pavlodar, 140008, Republic of Kazakhstan, e-mail: alibek_anarbaev@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0001-6890-8005>

Abdrakhmanov Bauyrzhan Tendikovich, Senior Lecturer, Toraigyrov University, Faculty of Energy, Pavlodar, 140008, The Republic of Kazakhstan, e-mail: bauyrrymten@mail.ru, <https://orcid.org/0009-0002-7817-1275>

Ayabayev Assyl Serikbayevich, Master's student, Faculty of Energy, Toraigyrov University, Pavlodar, 140008, Republic of Kazakhstan, e-mail: ayabayev@bk.ru, <https://orcid.org/0009-0006-1515-1233>

Aitmagambetov Altay Zufarovich, Candidate of Technical Sciences, Professor of the Department of "Radio Engineering, Electronics and Telecommunications," International Information Technologies University, Almaty, 050040, Republic of Kazakhstan e-mail: a.aitmagambetov@iitu.edu.kz. <https://orcid.org/0000-0002-7808-5273>

Alikhan Ulan Batyrkhanuly, Master's student in the specialty «Electric power industry (Renewable energy), Korkyt Ata Kyzylorda University, Institute of Engineering and technology, Kyzylorda, 020000, The Republic Of Kazakhstan, e-mail: alikhhan.ulan@mail.ru, <https://orcid.org/0009-0002-6571-0348>

Atyaksheva Alexandra Vladimirovna, S. Seifullin atyndagy Kazak agrotechnical science university, Zhyluenergetika department son docent. Astana,

010011, Kazakhstan Republics, e-mail: sahsa77@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0003-2523-3890>

Alimgazin Altai, Doctor of Technical Science, professor, L. N. Gumilyov Eurasian National University, Astana, 010008, Republic of Kazakhstan, e-mail: alimgazin_altai@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0002-5848-1842>

Batyrbek Alibek Yessimbekuly, doctoral student in the educational program «Auto-mation and management», Faculty of energy, transport and management systems, Karaganda industrial university, Temirtau, 101400, Republic of Kazakhstan, e-mail: alibek_batyrbek@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0002-3369-6804>

Baizhuma Zhandos Yeskendiruly, PhD, Acting associate professor, The Kazakh National University named after al-Farabi, Almaty, 050000-050063, Republic of Kazakhstan, e-mail: zhan-dos.baizhuma@kaznu.kz, <https://orcid.org/0000-0003-3692-2245>

Berdibekov Abdissattar Opabekovich, PhD Student, Kazakh National Research Technical University named after K. I. Satpayev (KazNITU), Almaty, 050013, Republic of Kazakhstan, e-mail: a.berdibekov@satbayev.university, <https://orcid.org/0000-0001-5943-432X>

Bekbayev Amangeldy Bekbayevich, Doctor of Technical Sciences, Professor Kazakh National Research Technical University named after K. I. Satpayev, Almaty city, 050000, Republic of Kazakhstan, e-mail: a.bekbayev@satbayev.university.kz, <https://orcid.org/0000-0003-3520-1710>

Bekbolatova Zhannat Kayirovna, PhD, Associate Professor Kazakh National Research Technical University named after K. I. Satpayev, Almaty city, 050000, Republic of Kazakhstan, e-mail: zh.bekbolatova@satbayev.university, <https://orcid.org/0000-0002-8219-6400>

Belyi Alexander Vladimirovich, Candidate of Geographical Sciences, Professor of "Geography and Tourism" Department, Toraigyrov University, Astana, 010000, Republic of Kazakhstan, e-mail: alexander.belyi@mail.ru

Baidildina Aizhan, PhD, associate professor, «D. Serikbayev East Kazakhstan technical university, D. Serikbayev East Kazakhstan technical university, Ust-Kamenogorsk, 070016, Republic of Kazakhstan, e-mail: azhapparova@edu.ektu.kz, <https://orcid.org/0000-0002-3793-5817>

Barukin Alexandr Sergeevich, PhD, professor, Toraigyrov University, Faculty of Energy, Pavlodar, 140008, Republic of Kazakhstan. e-mail: alexbarukin@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0002-5969-4030>

Baibeisenova Kymbat, Master's student 1st year in educational program 7M08705 Energy supply and automation of agriculture, S.Seifullin Kazakh Agrotechnical Research University, Astana, 010000, The Republic of Kazakhstan, e-mail: baibeisenovakima@gmail.com, <https://orcid.org/0009-0007-8482-8604>,

Gabdulov Asset Uralbaevich, doctoral student in the specialty "Thermal Power engineering" Toraigyrov University, Faculty of Energy, Pavlodar c., 140008, The Republic of Kazakhstan, e-mail: gabdulov25@mail.ru, <https://orcid.org/0009-0001-3266-8270>

Dostiyarov Abay Mukhamediyarovich, Doctor of Technical Sciences, Professor of the Institute of Thermal Power Engineering and Control Systems, Department of Thermal energy and physics, G. Daukeev Almaty University of Energy and Communications, Almaty, 050000, Republic of Kazakhstan, e-mail: a.m.dost1951@gmail.com, <https://orcid.org/0000-0002-6559-8598>

Djanargaliyeva Malika Ruslanovna, Master's student of the department "Geography and Tourism" in the direction "Tourism" Toraigyrov University Pavlodar, 140000, Republic of Kazakhstan, e-mail: malika_28-01@mail.ru

Duisembayeva Gulnur, Doctoral student of the 1st year in the specialty 8D07103, Heat Power Engineering, D. Serikbayev East Kazakhstan technical university, Ust-Kamenogorsk, 070016, Republic of Kazakhstan, e-mail: gdyusembaeva80@mail.ru, <https://orcid.org/0009-0003-5059-8223>

Daineko Yevgeniya Alexandrovna, PhD, Director of the Institute of Automation and Information Technology, Satbayev University. Associate Professor of the Department of Computer Engineering, International Information Technologies University, Almaty, 050040, Republic of Kazakhstan e-mail: y.daineko@iitu.edu.kz, <https://orcid.org/0000-0001-6581-2622>

Bekisheva Zhanna Taukenovna, Master of Engineering Sciences, Senior Lecturer, Department of Thermal Power Engineering, Faculty of Energy, Kazakh Agrotechnical Research University named after S.Seifullin, Astana, 010000, Republic of Kazakhstan, e-mail: Zhanna_1986_23@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0001-9224-2426>

Dinmukhanbetov Aigul Zhumageldyevna, PhD, associate professor, Toraigyrov University, Faculty of Energy, Pavlodar, 140008, Republic of Kazakhstan, e-mail: ardi100909@mail.ru, <https://orcid.org/0009-0005-8325-9724>

Berguzinov Askhat Nurlanovich, PhD, Professor, Toraigyrov University, Pavlodar, 140008, Republic of Kazakhstan, e-mail: askhat_berguzinov@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0001-6954-8259>

Yessimova Dinara Dautovna, Candidate of pedagogical sciences, head of department "Geography and tourism", Toraigyrov University, Pavlodar, 140000, Republic of Kazakhstan, e-mail: dika-73@mail.ru

Yessim Ayana Kazbekkyzy, Doctoral student in the direction "Service sphere" ENU named after L. N. Gumilev Astana, 010000, Republic of Kazakhstan, ayana_esimova99@mail.ru

Yesmakhanova Laura, PhD, Doctor of the Department of Automation and Telecommunications, Faculty of Technology, M .Kh.Dulaty Taraz University,

Taraz, 080000, The Republic of Kazakhstan, <https://orcid.org/0000-0002-3308-9676>, e-mail: laura060780@mail.ru

Zhumatova Asel Akanovna, Candidate of Technical Sciences, Associate Professor Kazakh National Research Technical University named after K. I. Satpayev, Almaty city, 050000, Republic of Kazakhstan, e-mail: a.zhumatova@satbayev.university.kz, <https://orcid.org/0000-0001-9606-7557>

Zhalmagambetova Ultuar, PhD, Professor of the Department of Thermal power engineering, Faculty Power engineers, Republic of Kazakhstan, Pavlodar, 140008, e-mail: ultuara@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0002-2261-2222>

Zhantlessova Asemgul Beisembayevna, PhD, Acting Associate Professor, doctor Kazakh State University named after S.Seifullin, Republic of Kazakhstan, the city of Astana, 010008, e-mail: acbizh@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0003-3730-0579>

Zhanserikkyzy Aknur, Master of Technical Sciences, Korkyt Ata Kyzylorda University, Institute of Engineering and technology, Kyzylorda, 020000, The Republic Of Kazakhstan, e-mail: zhanserikkyzy@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0002-6164-6775>

Ilyassova Gulzhan Ospanbekovna, PhD candidate in the field of «Thermal power engineering» The Kazakh National University named after Al-Farabi, Almaty, 050000-050063, Republic of Kazakhstan, e-mail: yliyassova_gulzhan@mail.ru, <https://orcid.org/0009-0008-6205-4959>

Imanaev MaratShamilievich, Director of Pavlodar Heating Networks LLP, Pavlodar, 140000, Republic of Kazakhstan, e-mail: M.Imanaev@pavlodarenergo.kz

Issabekova Bibigul Beisembayevna, PhD, Associate Professor, Faculty of computer science, Toraigyrov University, Pavlodar, 140008, Republic of Kazakhstan, e-mail: asbizh@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0001-5044-3211>

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, <https://orcid.org/0000-0003-3980-1617>

Isaev Valery Lvovich, Candidate of Technical Sciences, Department of «Energy Systems» Karagandinsky, Abylka Saginov Technical University, Faculty of Energy, Karaganda, 100027, Republic of Kazakhstan, e-mail: isaevvalerie@gmail.com, <https://orcid.org/0000-0003-1187-4638>

Ismailova Aiganym, PhD, Associate Professor, International Educational Corporation, Kazakh Leading Academy of Architecture and Civil Engineering, Associate Professor, Almaty, 050043, Republic of Kazakhstan, e-mail: i-smile@bk.ru <https://orcid.org/0000-0002-4234-0615>

Issenov Sultanbek Sansyzbaevich, Candidate of Technical Sciences, Associated Professor, S.Seifullin Kazakh Agrotechnical Research University,,

Astana, 010000, The Republic of Kazakhstan, e-mail: issenov.sultanbek@gmail.com, <https://orcid.org/0000-0003-4576-4621>

Kalytka Valery Alexandrovich, PhD, Associate Professor Department of «Energy systems», Karaganda Technical University named after abyllka Saginov, Karaganda, 100027, of the Republic of Kazakhstan, e-mail: kalytka@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0002-3232-1285>

Kamarova Saule Nurtazaevna, Phd, associate professor of the Department of «Energy», Karaganda Industrial University, Karaganda region, Temirtau, 101400, Republic of Kazakhstan, e-mail: cfekt.rfvfhjdf@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0001-8464-7204>

Katranova Gaziza Serikovna, PhD doctor, British American Tobacco Company, Almaty, 050000, Republic of Kazakhstan, e-mail: gaziza.katranova@mail.com, <https://orcid.org/0000-0003-0688-5324>

Karmanov Amangeldy Erbolovich, PhD, Head of the Department of Heat Power Engineering, Toraigyrov University, Pavlodar, 140003, Republic of Kazakhstan, e-mail: aman270685@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0001-7512-0275>

Kanapinov Medet, PhD, senior lecturer D. Serikbayev East Kazakhstan technical university, D. Serikbayev East Kazakhstan technical university, Ust-Kamenogorsk, 070016, Republic of Kazakhstan, e-mail: mega_bum_90@mail.ru, <https://orcid.org/0009-0002-6249-2373>

Kulakayeva Aigul Yergaliyevna, PhD, Associate Professor of the Department of "Radio Engineering, Electronics and Telecommunications," International Information Technologies University, Almaty, 050040, Republic of Kazakhstan, e-mail: a.kulakayeva@iitu.edu.kz, <https://orcid.org/0000-0002-0143-085X>

Kislov Aleksandr Petrovich, Candidate of Technical Sciences, docent, professor, Faculty of Energy, Toraigyrov University, Pavlodar, 140008, Republic of Kazakhstan, e-mail: kislovpsu@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0003-4816-8008>

Kulakayeva Aigul Yergaliyevna, PhD, Associate Professor of the Department of "Radio Engineering, Electronics and Telecommunications," International Information Technologies University, Almaty, 050040, Republic of Kazakhstan; e-mail: a.kulakayeva@iitu.edu.kz, <https://orcid.org/0000-0002-0143-085X>

Kozhakhmetova Bagdat Abdurashidovna, Assistant Professor of the Department of "Radio Engineering, Electronics and Telecommunications," International Information Technologies University, Almaty, 050040, Republic of Kazakhstan, e-mail: kozahmetova.ba@gmail.com, <https://orcid.org/0000-0002-9566-3629>

Kushanova Dinara, Master's student in Chemical Engineering of Hydrocarbon Compounds, Institute of Geology and Oil & Gas Business, Satbayev

University, Almaty, 050013, Republic of Kazakhstan, e-mail: 88dilya@gmail.com, [https:// 0009-0002-3058-7634](https://0009-0002-3058-7634)

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, <https://orcid.org/0000-0001-9485-0425>

Kudaybergen Zulkharnay, student, Korkyt Ata Kyzylorda University, Institute of Engineering and technology, Kyzylorda, 020000, The Republic Of Kazakhstan, e-mail: kudaybergenzulkharnay2007@gmail.com, <https://orcid.org/0009-0006-6234-0520>

Kaltayev Abdulla Gabydmanapuly, Associate Professor, Toraighyrov University, Pavlodar, 140000, Republic of Kazakhstan, e-mail: abdulla911@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0003-1684-3347>

Kazybek Zhanelya Ganikyzy, master's student in «Electrical Engineering», «Almaty University of Power Engineering and telecommunications named after Gumarbek Daukeev», «Department of Electricity supply and renewable energy sources», Almaty 050013, Republic of Kazakhstan, e-mail: zh.kazybek@aes.kz, <https://orcid.org/0009-0003-0230-8308>

Kuatova Anar Stalovna, Kazakh Agrotechnical Research University named after S. Seifullin, Department of Power Supply, Astana, 010000, Republic of Kazakhstan, e-mail: anarkuatova2019@gmail.com, <https://orcid.org/0000-0001-8972-1346>

Kalassov Nurdaulet Bolatuly, PhD, Acting associate professor The Kazakh National University named after al-Farabi Almaty 050000-050063, Republic of Kazakhstan, e-mail: kalasov.nurdaulet@gmail.com, <https://orcid.org/0000-0003-3709-5544>

Larkin Viktor, Deputy General Director for Production, «SevKazErgoProm» Scientific and Production Company, Republic of Kazakhstan, Pavlodar, 140006, e-mail: r.tashlykova@skep.kz, <https://orcid.org/0009-0008-2079-3358>

Medetov Bekbolat Zhaksylykovich, PhD, Associate Professor of the Department of "Radio Engineering, Electronics and Telecommunications", L.N. Gumilyov Eurasian National University, Astana, 010008, Republic of Kazakhstan, e-mail: bm02@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0002-5594-8435>

Mashrapova Rizagul Megdaniyatovna, PhD, assoc. professor, Toraighyrov University, Faculty of Energy, Pavlodar, 140008, Republic of Kazakhstan. e-mail: rizka1504@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0001-9509-5767>

Mashrapov Bauyrzhan Erbolovich, PhD, associate professor, Toraighyrov University, Faculty of Energy, Pavlodar, 140008, Republic of Kazakhstan, e-mail: bokamashrapov@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0002-3018-4125>

Moldakhmetov Sayat Sairanovich, Associate Professor, Department of Power Engineering and Radioelectronics, Faculty of Engineering and Digital Technologies, North Kazakhstan University named after M. Kozybayev, Petropavlovsk, 150000, Republic of Kazakhstan, e-mail: ssmoldahmetov@ku.edu.kz, <https://orcid.org/0000-0003-2432-7983>

Nurmaganbetova Gulim Sakhitovna, PhD, Acting Associate Professor S.Seifullin Kazakh Agrotechnical Research University Astana, 010000, Republic of Kazakhstan, e-mail: g_sahitovna@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0002-9529-2477>

Medetov Bekbolat Zhaksylykovich, PhD, Associate Professor of the Department of "Radio Engineering, Electronics and Telecommunications", L.N. Gumilyov Eurasian National University, Astana, 010008, Republic of Kazakhstan, e-mail: bm02@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0002-5594-8435>

Madeniyet Yelubay, Candidate of Chemical Science, Dean of the Faculty of Natural Sciences, Professor, Toraighyrov University, Pavlodar, 140008, Republic of Kazakhstan, Humboldt-Innovation GmbH, Berlin, 10115, Germany, e-mail: yelubay.m@tou.edu.kz, <https://orcid.org/0000-0002-6209-5215>

Torgaev Talgat, engineer-mechanic, Master of Technical Sciences, Korkyt Ata Kyzylorda University, Institute of Engineering and technology, Kyzylorda, 020000, The Republic Of Kazakhstan, e-mail: ulan_alikhan@mail.ru, <https://orcid.org/0009-0006-9048-7546>

Meirbekova Oxana Dairovna, Senior Lecturer, Akhmet Yassawi International Kazakh-Turkish University, Turkistan, 161200, Republic of Kazakhstan, e-mail: oksana_120183@mail.ru, <https://orcid.org/0000-00030949-1443>

Muzaparov Dauren Tokzhanovich, PhD student in Power engineering, Toraighyrov University, Pavlodar, 140000, Republic of Kazakhstan, e-mail: mdt07@bk.ru, <https://orcid.org/0009-0009-0733-2343>

Mekhtiev Ali Javanshirovich, Candidate of Technical Sciences, Associate Professor, Karaganda Technical University named after Abylka Saginov, Member of the Board, Vice-Rector for Research, Karaganda, 100008, Republic of Kazakhstan, e-mail: kz@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0002-2633-3976>

Mekhtiev Ruslan Alievich, Research Associate Kazakh Agrotechnical Research University named after S. Seifullin, Department of Electrical Equipment Operation, Astana, 010000, Republic of Kazakhstan, e-mail: iyev@gmail.com, <https://orcid.org/0000-0001-5416-3444>

Mergalimova Almagul Kairbergenovna, PhD, Associate Professor, Faculty of Energy, Kazakh Agrotechnical Research University named after S. Seifullin, Astana, 010000, The Republic of Kazakhstan, e-mail: almagul_mergalimova@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0002-5990-8182>

Neshina Elena Gennadiyevna, Candidate of Technical Science, Head of the Department of «Energy Systems», Abylka Saginov Karaganda Technical

University, Faculty of Energy, Karaganda, 100027, The Republic of Kazakhstan, e-mail: l_neg@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0002-8973-2958>

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, <https://orcid.org/0000-0002-6977-0957>

Nurgali Ayan, Eraliulymaster's student in «Modern and innovative technologies of renewable energy» «Almaty University of Power Engineering and telecommunications named after Gumarbek Daukeev, «Department of Electricity supply and renewable energy sources, 050043, Republic of Kazakhstan, e-mail: a.nurgali@aes.kz, <https://orcid.org/0009-0000-3678-9099>

Nurkasen Nurbek, Asanulymaster's student in «Electrical Engineering», «Almaty University of Power Engineering and telecommunications named after Gumarbek Daukeev, Department of Electricity supply and renewable energy sources», Almaty, 050013, Republic of Kazakhstan, e-mail: nurbeknurkasenov@gmail.com, <https://orcid.org/0009-0007-9315-7312>

Nussupov Yerzhan, doctoral student in «Telecommunication» Department of Electronics, Telecommunications and Space Technologies, Institute of Automation and Information Technologies, K.I. Satbayev Kazakh National Research Technical University, Almaty, 050013, Republic of Kazakhstan, e-mail: nussupov.erzhan@gmail.com, <https://orcid.org/0009-0008-5118-3683>

Naubetov Daulet Abatuly, Master of Technical Sciences, Senior Lecturer, Almaty University of Power Engineering and Telecommunications named after Gumarbek Daukeyev, Institute of Information Technologies, Department of Cybersecurity, Almaty, 050013, Senior Research Fellow, Republic of Kazakhstan, Satbayev University, Almaty, 050013, Republic of Kazakhstan e-mail: daul.naubetov@gmail.com, <https://orcid.org/0000-0002-0323-0675>

Oleinik Sergey Ivanovich, Candidate of Technical Sciences, Director of ENEKO LLP, Pavlodar, 140002, Republic of Kazakhstan, e-mail: olejnik_pte@mail.ru

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@aes.kz, <https://orcid.org/0000-0002-2018-8835>

Rasmukhametova Ainur, PhD, associate professor, «Almaty University of Power Engineering and telecommunications named after Gumarbek Daukeev», «Department of Electricity supply and renewable energy sources, Almaty 050013, Republic of Kazakhstan, e-mail: a.rasmukhametova@aes.kz, <https://orcid.org/0000-0003-1376-6112>

Sivyakova Galina Alexandrovna, Candidate of technical sciences, associate profes-sor, Faculty of energy, transport and management systems, Karaganda industrial university, Temirtau, 101400, Republic of Kazakhstan, e-mail: g.sivyakova@tttu.edu.kz, <https://orcid.org/0000-0001-7689-8433>

Smagulova Karshiga Kanatovna, PhD doctor, associate pro-fessor, Karaganda State Technical University named after A. Saginov, Karaganda city, 100027, Republic of Kazakhstan e-mail: smagulo-vakk83@gmail.com, <https://orcid.org/0000-0001-6834-8490>

Sapargaliyeva Aigerim Nurzhanovna, PhD student in the specialty of Thermal power engineering, S.Seifullin Kazakh Agrotechnical Research University, Energy faculty, Astana, 010000, Republic of Kazakhstan, e-mail: ms.lady.aigerima@bk.ru, <https://orcid.org/0009-0009-4781-2528>

Safarbakov Alexey Albertovich, Candidate of Technical Sciences, Director of Pavlodartekhenenergo LLP, Pavlodar, 140002, Republic of Kazakhstan, e-mail: safarbakov@mail.ru

Sagyndyk Aigerim Bekenkyzy, PhD, postdoctoral fellow Toraighyrov University, Faculty of Energetics, Pavlodar, 140008, Republic of Kazakhstan, e-mail: aiko_90@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0003-0376-2150>

Samoshkin Dmitry, Research Associate Novosibirsk State University, Novosibirsk, Russia, Novosibirsk State University Novosibirsk 630090, Russian Federation, e-mail: a.samoshkin@gmail.com, <https://orcid.org/0000-0002-7074-7762>

Sarsikeev Ermek Zhaslanovich, PhD, Associate Professor Kazakh Agrotechnical Research University named after S. Seifullin, Department of Electrical Equipment Operation, Astana, 010000, Republic of Kazakhstan, e-mail: sarsikeev.ermek@yandex.ru, <https://orcid.org/0000-0002-7209-5024>

Seitzhapparov Nursultan Kurmangazyuly, doctoral student in educational program D098 «Thermal Power Engineering», Faculty of Transport and Energy, Eurasian National University named after L. N.Gumilyov, Astana, 010000, Republic of Kazakhstan, e-mail: nurs.zhidebay@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0002-7624-1367>

Sultanguzin Ildar, Doctor of Technical Sciences, Professor at the National Research University «MPEI», Moscow, 111250, Russian Federation, e-mail: SultanguzinIA@mpei.ru, <https://orcid.org/0000-0001-6324-5214>

Suleimenov Kanat, Technical Director, LLP «Innovation Technology Center», Astana, 010000 Republic of Kazakhstan, e-mail: katu_skb61@mail.ru, <https://orcid.org/0009-0005-6283-9164>

Sabibolda Akezhan Muratuly, PhD, Senior Lecturer, Department of Electronics, Telecommunications and Space Technologies, Satbayev University, Almaty, 050013, Republic of Kazakhstan; researcher, Institute of Mechanics and Mechanical Engineering named after Academician U. A. Dzholdasbekov Almaty,

050010, Republic of Kazakhstan, <https://orcid.org/0000-0002-1186-7940>, e-mail: sabibolda98@gmail.com

Smailov Nurzhigit Kuralbayuly, PhD, Professor at the Department of Electronics, Telecommunications and Space Technologies, Institute of Automation and Information Technologies, «Satbayev University, Almaty, 050013, Republic of Kazakhstan, researcher, Institute of Mechanics and Mechanical Engineering named after Academician U. A. Dzholdasbekov Shevchenko str., 28, Almaty, 050010, Republic of Kazakhstan, e-mail: n.smailov@satbayev.university, <https://orcid.org/0000-0002-7264-2390>

Sarsenbaev Erlan Aliaskarovich, PhD, Head of the Department of Energy, Associate Professor Non-profit joint-stock company Kazakh National Research Technical University named after K. I. Satpayev Almaty 050013 Republic of Kazakhstan. e-mail: sarsenbayev@satbayev.university, <https://orcid.org/0000-0002-8887-1171>

Tatkeeva Galina Galimzyanovna, Doctor of Technical Sciences, Associate Professor of the Department of Power Supply, S. Seifullin Kazakh Agrotechnical Research University, Astana, Republic of Kazakhstan, e-mail: tatkeeva@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0001-9518-4567>

Tytiuk Valerii Konstantinovich, Doctor of Technical Sciences, Professor, Faculty of Electrical Engineering, Kryvyi Rih National University, Kryvyi Rih, 50002, Ukraine, e-mail: tyti-uk@knu.edu.ua, <https://orcid.org/0000-0003-1077-3288>

Tumanov Musakul Elegenovich, candidate of Technical Sciences, Associate Professor of the Institute of Thermal Power Engineering and Control Systems, Department of Thermal energy and physics, G. Daukeev Almaty University of Energy and Communications, Almaty, 050000, Republic of Kazakhstan, e-mail: m.tumanov@aes.kz, <https://orcid.org/0000-0002-0093-719X>

Tashlykova Raisa, Advisor to the General Director of NPF «SevKazEnergProm» LLP, Republic of Kazakhstan, Pavlodar, 140006, e-mail: r.tashlykova@skep.kz, <https://orcid.org/0009-0004-7285-9305>

Tulebaeva Zhanar, Amangeldinovna, doctoral student in the specialty Thermal Power engineering Toraigyrov University, Faculty of Energy, Pavlodar c., 140008, The Republic of Kazakhstan, e-mail: tulebaeva.zhanar@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0002-4289-9777>

Talipov Olzhas Manarbekovich, PhD, Associate Professor, Dean of the Faculty of Energetics, Toraigyrov University, Pavlodar, 140000, Republic of Kazakhstan, e-mail: talipov1980@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0002-8355-1769>

Tasbolat Galymzhan, PhD student, L. N. Gumilyov Eurasian National University, Astana, 010008, Republic of Kazakhstan, e-mail: tasbolat_gzh@enu.kz, <https://orcid.org/00000002-3790-2097>

Tashtay Yerlan, Candidate of Technical Sciences, Head of the Department of Electronics, Telecommunications, and Space Technologies, Kazakh National Research Technical University named after K. I. Satpayev, Almaty, 050013, Republic of Kazakhstan, e-mail: y.tashtay@satbayev.university, <https://orcid.org/0000-0002-0809-537XUmysheva>

Madina Maratovna, Doctoral candidate, Master of Engineering Sciences Non-profit joint-stock company Kazakh National Research Technical University named after K. I. Satpayev Almaty 050013, Republic of Kazakhstan, e-mail: m.umysheva@satbayev.university, <https://orcid.org/0009-0009-4748-611X>

Umyshev Dias Raybekovich, PhD, Professor, Associate Professor Non-profit joint-stock company Kazakh National Research Technical University named after K. I. Satpayev Almaty, 050013, Republic of Kazakhstan, e-mail: d.umyshev@satbayev.university, <https://orcid.org/0000-0001-6834-1635>

Faurat Alina Alexandrovna, Associate Professor of the Department of Geography and Tourism, Toraigyrov University, Pavlodar, 140000, Republic of Kazakhstan, e-mail: alina03.09@mail.ru

Tserendorj Tssetsgee, Postgraduate Student at the National Research University «MPEI», Moscow, 111250, Russian Federation, e-mail: TserendorzhT@mpei.ru, <https://orcid.org/0009-0009-4827-7221>

Shaimerdenova Rymtay Tokenovna, Kazakh Agrotechnical Research University named after S. Seifullin, Department of Electrical Equipment Operation, Astana, 010000, Republic of Kazakhstan, e-mail: rma71@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0002-0241-6961>

Ybray Sultan Barlymbayuly, Senior Lecturer of the Department of Thermal Energy, Kazakh Agricultural Research University named after S. Seifullin. Astana, 010011, Republic of Kazakhstan, e-mail: sultanybray@gmail.com, <https://orcid.org/0000-0002-5262-2149>

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.*). Рекомендуемое количество ключевых слов – 5-8, количество слов внутри ключевой фразы – не более 3. Задаются в порядке их значимости, т.е. самое важное ключевое слово статьи должно быть первым в списке (см. образец);

10 **Основной текст статьи** излагается в определенной последовательности его частей, включает в себя:

- **Введение / 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 ссылок, т.е. источники, которые не имели место в статье, но рекомендованы вами читателям для ознакомления, как смежные работы, проводимые параллельно. *Объем не менее 10 не более чем 20 наименований* (ссылки и примечания в статье обозначаются сквозной нумерацией и заключаются в квадратные скобки). 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 подрисовочные 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. 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).

Е-mail: 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 TSESZKZK A Кбе 16 Код 16 КНП 861	АО «Народный Банк Казахстана» ИИК KZ156010241000003308 БИК HSBKZKZKX Кбе 16 Код 16 КНП 861	

ОБРАЗЕЦ К ОФОРМЛЕНИЮ СТАТЕЙ

МРНТИ 14.37.27

DOI xxxxxxxxxxxxxxx

***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 искомых 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 университеті, 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. Торайғырова; СПб. : ГАФКиС им. П. Ф. Лесгафта, 2005. – 270 с.

References

1 **Dahin, A. N.** Pedagogisches 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.** Pedagogisches 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 әсеке және кәсіби құзыреттерін 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, құзыреттілік, біліктілікті арттыру, әлеуметтік қызметкерлер.

S. K. Antikeeva

Toraighyrov 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_antikeeva@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_antikeeva@mail.ru, 8-000-000-00-00	Samal Kanatovna Antikeeva doctoral student in «Pedagogy and psychology» «Toraighyrov University» NCJSC, Faculty of Humanities and Social Sciences, Pavlodar, 140008, Republic of Kazakhstan, samal_antikeeva@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 редколлегии 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 17.12.2025 ж. жіберілді. Басуға 30.12.2025 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 № 4494

Сдано в набор 17.12.2025 г. Подписано в печать 30.12.2025 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 № 4494

«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