

Надир Кадырович Ибрагимов – кандидат технических наук, старший преподаватель кафедры «Технологическое оборудование», Шәкәрім университеті, г. Семей, Республика Казахстан; e-mail: ibragimnk@mail.ru. ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-9607-823X>.

Әди Сержанұлы Шенгельбаев – студент образовательной программы 6B07105 – «Технологические машины и оборудование», Шәкәрім университеті, г. Семей, Республика Казахстан; e-mail: shengelbaevadi.2004@gmail.com. ORCID: <https://orcid.org/0009-0007-2652-9243>.

Авторлар туралы мәліметтер

Мадина Канатовна Шаяхметова* – PhD, Шәкәрім университеті, Семей қаласы, Қазақстан Республикасы; e-mail: madina07sh@mail.ru. ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-5133-4348>.

Борис Анатольевич Лобасенко – техника ғылымдарының докторы, «Өнеркәсіптік дизайн» кафедрасының профессоры, Кемерово мемлекеттік университеті, Ресей Федерациясы; e-mail: lobasenko@mail.ru. ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-0245-7904>.

Галия Бекеновна Абдилова – техника ғылымдарының кандидаты, қауымдастырылған профессор, «Технологиялық жабдықтар» кафедрасының меңгерушісі, Шәкәрім университеті, Семей қаласы, Қазақстан Республикасы; e-mail: abdilova1979@bk.ru. ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-6647-6314>.

Надир Кадырович Ибрагимов – техника ғылымдарының кандидаты, «Технологиялық жабдықтар» кафедрасының аға оқытушысы, Шәкәрім университеті, Семей қаласы, Қазақстан Республикасы; e-mail: ibragimnk@mail.ru. ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-9607-823X>.

Әди Сержанұлы Шенгельбаев – 6B07105 «Технологиялық машиналар мен жабдықтар» білім беру бағдарламасының студенті, Шәкәрім университеті, Семей қаласы, Қазақстан Республикасы; e-mail: shengelbaevadi.2004@gmail.com. ORCID: <https://orcid.org/0009-0007-2652-9243>.

Information about the authors

Madina Shayakmetova* – PhD, Shakarim University, Semey city, Republic of Kazakhstan; e-mail: madina07sh@mail.ru. ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-5133-4348>.

Boris Lobasenko – Doctor of Technical Sciences, Professor, Industrial Design Department, Kemerovo State University, Russian Federation; e-mail: lobasenko@mail.ru. ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-0245-7904>.

Galiya Abdilova – Candidate of Technical Sciences, Associate Professor, Head of the Department of «Technological Equipment», Shakarim University, Semey city, Republic of Kazakhstan; e-mail: abdilova1979@bk.ru. ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-6647-6314>.

Nadir Ibragimov – candidate of Technical Sciences, senior lecturer «Technological Equipment», Shakarim University, Semey city, Republic of Kazakhstan; e-mail: ibragimnk@mail.ru. ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-9607-823X>.

Adi Shengelbaev – student of the educational program 6B07105 – «Technological machines and equipment», Shakarim University, Semey city, Republic of Kazakhstan; e-mail: shengelbaevadi.2004@gmail.com. ORCID: <https://orcid.org/0009-0007-2652-9243>.

Поступила в редакцию 16.05.2025

Поступила после доработки 26.08.2025

Принята к публикации 29.08.2025

[https://doi.org/10.53360/2788-7995-2025-4\(20\)-30](https://doi.org/10.53360/2788-7995-2025-4(20)-30)

MPHTI: 55.38.29



Е.А. Толекенов*, Е.Я. Шаяхметов, Р.А. Советбаев, Г.М. Кудайбергенова

Шәкәрім университет,
071412, Республика Казахстан, г. Семей, ул. Глинки, 20 А
*e-mail: yerassultol@gmail.com

ПЕРСПЕКТИВЫ И КОНСТРУКТИВНОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ НАКОПИТЕЛЕЙ ЭНЕРГИИ СЖАТОГО ВОЗДУХА (CAES)

Аннотация: Технология CAES сочетает механическую и термодинамическую формы хранения энергии. Она может быть масштабирована от локальных модульных установок до промышленных решений. Главные преимущества: большой объем хранения энергии, длительное время работы без подзарядки, возможность интеграции с солнечными и ветровыми электростанциями, потенциально низкая стоимость при массовом внедрении. В условиях роста

доли возобновляемых источников энергии (ВИЭ) и необходимости обеспечения устойчивости энергосистем, технологии хранения энергии приобретают стратегическое значение. Настоящая статья посвящена комплексному анализу технологии накопителей энергии сжатого воздуха (CAES), включая её сравнительную оценку с другими системами хранения, конструктивные особенности, преимущества и вызовы внедрения. Особое внимание уделено потенциалу применения CAES в Республике Казахстан с учётом климатических, геологических и экономических условий. Рассматриваются инновационные подходы, включая термомеханическую CAES, как перспективное направление для Казахстана. В работе также приведены результаты исследовательского анализа, выявлены ключевые барьеры и предложены меры по их преодолению. Статья основана на данных отечественных и зарубежных источников, моделях и экспертных оценках, и может служить основой для формирования национальной стратегии развития технологий накопления энергии.

Ключевые слова: Технология CAES, накопители энергии, возобновляемые источники энергии, сжатый воздух, компрессоры.

Введение

Переход к возобновляемым источникам энергии (ВИЭ) требует надёжных и масштабируемых систем хранения энергии. Одной из наиболее перспективных технологий в этом направлении являются накопители энергии сжатого воздуха (Compressed Air Energy Storage, CAES). В условиях нестабильной генерации от солнца и ветра CAES позволяет аккумулировать избыток энергии и выдавать его в сеть в часы пикового спроса, стабилизируя электроснабжение. Для Казахстана, активно развивающего «зелёную энергетику», CAES может стать ключевым элементом энергетической инфраструктуры будущего. Уникальные природные и геологические условия делают страну идеальным кандидатом для внедрения данной технологии.

Принцип работы CAES

Принцип работы CAES основан на преобразовании избыточной электроэнергии в сжатый воздух, его хранении и последующем преобразовании обратно в электроэнергию.

Стадия накопления энергии: в периоды избыточной генерации (например, при сильном ветре или солнечном излучении) электрическая энергия используется для привода компрессоров. Компрессоры сжимают воздух и закачивают его в подземное хранилище – например, в соляную каверну, шахту или специально оборудованный резервуар.

Стадия хранения: сжатый воздух может находиться в хранилище от часов до недель, в зависимости от конструкции.

Стадия генерации: при повышении спроса воздух подаётся на турбину. В зависимости от типа системы, воздух может предварительно нагреваться. Турбина вращается, вырабатывая электричество. Таким образом, CAES функционирует как аккумулятор с высокой ёмкостью и длительным временем хранения.

Исследование

Исследования в области хранения энергии сжатым воздухом активно проводятся в различных странах. Наибольшие успехи достигнуты в США и Европе, где технологии CAES широко применяются для стабильности электросетей.

Исследования в Европе: в Германии и Великобритании рассматривают возможность использования CAES для интеграции с ВИЭ. Германия, с её мощными ветровыми станциями, активно развивает проекты адиабатической CAES. В частности, компания «RWE» разрабатывает проект в Гамбурге, направленный на создание пилотного AA-CAES. Это проект позволит интегрировать ветровую энергию в сеть и обеспечит гарантированное энергоснабжение в пиковые часы.

Исследования в США: в США с 1970-х годов ведутся эксперименты с CAES. На сегодняшний день существует несколько крупных установок, например, в штатах Алабама и Нью-Йорк. Ранее использовавшиеся угольные шахты были адаптированы для хранения сжатого воздуха, что значительно сократило капитальные затраты.

Для Казахстана исследования и внедрение таких технологий представляют значительный интерес. В стране существует огромный потенциал для создания подобных установок на базе существующих шахт и соляных пластов. Геологические условия региона позволяют реализовать большие проекты по хранению сжатого воздуха, что создаёт дополнительные возможности для использования ВИЭ в удалённых регионах, где традиционные способы хранения энергии малоприменимы.

Внедрение технологии CAES, особенно в адиабатическом варианте (AA-CAES), представляет собой стратегически важный шаг для Казахстана, поскольку снижает зависимость от традиционных источников энергии: Казахстан активно использует уголь для производства энергии, что приводит к высоким выбросам углекислого газа. Переход на технологии ВИЭ и CAES позволит сократить углеродный след, повышая устойчивость энергетической системы. Увеличивает энергетическую независимость: Адиабатическая система хранения энергии обеспечит большую гибкость в распределении энергии, позволяя Казахстану сохранять избытки электроэнергии, производимой ветровыми и солнечными станциями, для использования в периоды пикового спроса.

Экономическая эффективность: Хотя начальные инвестиции в CAES могут быть значительными, долгосрочные выгоды в виде снижения затрат на эксплуатацию и повышение эффективности производства энергии могут стать решающими. Использование существующих геологических структур, таких как шахты или соляные пещеры, может существенно снизить капитальные затраты.

Сравнение типов CAES и других технологий хранения

Среди технологий хранения энергии CAES выделяется как наиболее перспективная для крупных масштабов (табл. 1).

Таблица 1 – Основные типы CAES

Тип	Преимущества	Недостатки
Диабатическая CAES	Простота конструкции	Использует топливо (газ), низкий КПД
Адиабатическая CAES (AA-CAES)	Высокий КПД, без топлива, экологичность	Сложность теплоизоляции и хранения тепла
Изотермическая CAES	Максимальная эффективность при малых объемах	Сложно реализовать в больших масштабах
Литий-ионные батареи	Высокая эффективность, компактность	Высокая стоимость, ограниченный срок службы
Гидроаккумуляторы	Долговечность, зрелая технология	Требует специфических геологических условий

Адиабатическая CAES (AA-CAES) – это наиболее эффективный и экологичный вариант среди всех видов CAES. Её преимущества, Не требует использования топлива, Повторно использует тепло от сжатия воздуха, Имеет высокий КПД (до 70%), Безвредна для окружающей среды, Идеально сочетается с ВИЭ. AA-CAES – это шаг к полной декарбонизации энергетики и технологической независимости. Конструкция CAES включает: компрессоры и теплообменники, воздухохранилища (подземные или наземные), турбогенераторы, системы управления и безопасности.

В Казахстане могут быть использованы бывшие угольные или рудные шахты, что позволит существенно снизить капитальные затраты. Например, шахты Карагандинского угольного бассейна или Жезказганского региона.

Казахстан обладает рядом конкурентных преимуществ: ВИЭ-потенциал: юг и запад страны – идеальные зоны для ветровой и солнечной энергетики, наличие выработанных шахт, соляных пластов. Возможность обеспечения стабильности в удалённых регионах, снижение импорта электроэнергии, развитие новых производств.

CAES поможет Казахстану перейти к устойчивой энергетике без ущерба для промышленного развития. Для Казахстана можно предложить следующие инновационные подходы: Гибридные станции CAES + ВИЭ в Жамбылской и Мангистауской областях. Использование шахт в Карагандинской и Жезказганской областях под воздухохранилища. Модульные установки для аграрных регионов (Акмолинская, Костанайская области). Автономные энергетические комплексы для труднодоступных территорий (ЮКО, Восточный Казахстан). Испытательный центр в Кызылординской области для научной и промышленной апробации.

Также в своей магистерской работе автор проводит исследование и предлагает для ветроустановок малой мощности использование системы ресиверов (хранилище сжатого воздуха), количество которых можно изменять в зависимости от количества потребителей, средней скорости ветра и количества ветреных дней в году (рис. 1). Проводимое

исследование и проведенный анализ литературы показывает что использование ветроустановок в условиях Казахстана приводит к зависимости от погодных условий (наличия и скорости ветра) и нестабильной подаче электроэнергии. Поэтому использование совместно с ветроустановками хранилищ сжатого воздуха является целесообразным и позволяет аккумулировать энергию сжатого воздуха и использовать ее при отсутствии ветра. Согласно представленной схеме (рис. 1) ветротурбина вращает компрессор, который подает сжатый воздух в ресиверы (или систему ресиверов объемом по 100литров каждый), количество которых можно подбирать в зависимости от погодных условий региона. Далее сжатый воздух подается в пневмодвигатель, который вращает генератор, вырабатывающий электроэнергию. Это довольно упрощенная схема ветроустановки малой мощности, показывает принцип работы, рассчитанной на эксплуатацию в малых крестьянских хозяйствах в условиях Казахстана. В данной схеме не показаны электромагнитные клапаны для регулирования потока воздуха в ресиверы, электроконтактные манометры для контроля давления в ресиверах, контроллеры и другая необходимая автоматика, ее мы покажем в более подробной схеме после проработки в магистерской диссертации.

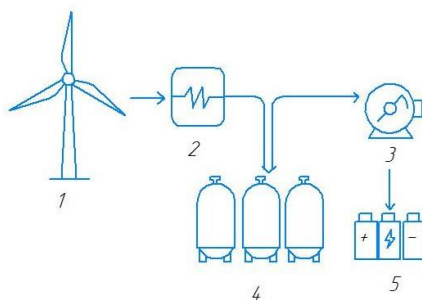


Рисунок 1 – Схема ветроустановки малой мощности с системой ресиверов

1 – ветротурбина, 2 – компрессорная установка, 3 – генератор,
4 – резервуар для хранения сжатого воздуха, 5 – аккумулятор

Заключение

Накопители энергии сжатого воздуха представляют собой жизнеспособную альтернативу химическим системам хранения, особенно в масштабах крупных энергетических систем. Их перспективность обусловлена возможностью интеграции с ВИЭ, высокой надёжностью и экологичностью. Развитие технологий теплоаккумулирования и создание новых материалов позволит повысить эффективность и экономическую целесообразность CAES в ближайшем будущем. В Казахстане перспективы внедрения CAES особенно актуальны с учетом высокой солнечной и ветровой активности в республике. Наличие обширных степей и геологических формаций создает потенциал для строительства как подземных, так и наземных хранилищ. Интеграция CAES с быстро развивающимися ветровыми и солнечными электростанциями, особенно в регионах с переменной генерацией (например, Жамбылская и Актюбинская области), позволит стабилизировать энергосистему и повысить надежность энергоснабжения. Кроме того, развитие таких технологий соответствует стратегическим задачам Казахстана по декарбонизации и энергетической независимости. Особое внимание заслуживает район Жангиз-Тобе в Восточно-Казахстанской области, где уже ведется активное развитие ветроэнергетических проектов. Благодаря благоприятным природным условиям, таким как стабильные ветровые потоки и удалённость от густонаселённых территорий, Жангиз-Тобе может стать пилотной площадкой для внедрения систем CAES. Это обеспечит дополнительную гибкость энергосистемы региона и создаст условия для локальной энергетической устойчивости.

Список литературы

1. Hutchison A. Compressed Air Energy Storage (CAES) / A. Hutchison // Overview and Applications. Energy Engineering. – 2012. – № 109(3). – P. 57-68. <https://doi.org/10.1080/01998595.2012.1001052>.
2. Bishop B. The Potential for Compressed Air Energy Storage in the United States / B. Bishop, R. Blennerhassett // Renewable and Sustainable Energy Reviews. – 2013. – № 19. – P. 39-48. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2012.11.046>.

3. A Review of the Development of Compressed Air Energy Storage Technology in the Last Decade / Y. Zhao et al // Renewable and Sustainable Energy Reviews. – 2016. – № 58. – P. 1167-1178. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2015.12.327>.
4. Rwe J. Adiabatic Compressed Air Energy Storage / J. Rwe // The New Frontier for Green Energy Storage. Renewable Energy. – 2017. – № 46. – P. 323-332. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2017.01.012>.
5. A Comprehensive Review of Compressed Air Energy Storage (CAES) and Its Applications / L. Liu et al // Journal of Energy Storage. – 2018. – № 21. – P. 67-80. <https://doi.org/10.1016/j.est.2018.01.006>.
6. Compressed Air Energy Storage for Large-Scale Energy Systems / E. Lysen et al // Journal of Power Sources. – 2005. – № 145(1). – P. 162-171. <https://doi.org/10.1016/j.jpowsour.2004.11.014>.
7. Hughes J. Technological and Economic Feasibility of Compressed Air Energy Storage Systems: A Review / J. Hughes, S. Asgarian // Energy Conversion and Management. – 2019. – № 185. – P. 537-549. <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2019.02.056>.
8. Capasso L. Assessing the Impact of Compressed Air Energy Storage in Power Systems with High Penetration of Renewable Energy / L. Capasso, P. Mancarella // Energy. – 2015. – № 81. – P. 384-393. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2014.12.040>.
9. Bai X. Optimal Design and Operation of A CAES System in Hybrid Energy Systems: A Review of Recent Advances / X. Bai, T. Qiu // Applied Energy. – 2020. – № 261. – P. 114402. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2019.114402>.
10. Yang C. A Study on the Application of Adiabatic Compressed Air Energy Storage Systems in Renewable Energy Grid Integration / C. Yang, S. Xu // Renewable Energy. – 2021. – № 166. – P. 1316-1327. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2020.12.026>.

Y.A. Tolekenov*, Y.Ya. Shayakhmetov, R.A. Sovetbayev, G.M. Kudaibergenova

Shakarim University,
071412, Republic of Kazakhstan, Semey, 20A Glinki St.
*e-mail: yerassultol@gmail.com

СЫҒЫЛҒАН АУАМЕН ЭНЕРГИЯ САҚТАУ (CAES) ЖҮЙЕЛЕРІНІҢ БОЛАШАҒЫ ЖӘНЕ ЖОБАЛАУ ҚОЛДАУЫ

CAES технологиясы механикалық және термодинамикалық энергия сақтау түрлерін біріктіреді. Бұл технология жергілікті модульдік қондырғылардан бастап өнеркәсіптік ауқымдағы шешімдерге дейін ауқымды түрде бейімделе алады. Оның басты артықшылықтарына жоғары энергия сақтау сыйымдылығы, қайта зарядтаусыз ұзақ жұмыс уақыты, күн және жел электр станцияларының интеграциясымен үйлесімділігі, сондай-ақ жаппай енгізу жағдайында төмен өзіндік құн мүмкіндігі жатады. Жаңартылатын энергия көздерінің (ЖЭК) үлесі артып, электр энергетикалық жүйелердің тұрақтылығын қамтамасыз ету қажеттілігі күшейген сайын, энергия сақтау технологиялары стратегиялық маңызға ие болуда.

Бұл мақалада сығылған ауамен энергия сақтау (CAES) технологиясына жан-жақты талдау жасалады, оның ішінде басқа сақтау жүйелерімен салыстырмалы бағалау, жобалау ерекшеліктері, артықшылықтары және жүзеге асырудағы қиындықтар қарастырылады. Қазақстан Республикасының климаттық, геологиялық және экономикалық ерекшеліктерін ескере отырып, елімізде CAES технологиясын қолдану әлеуетіне ерекше назар аударылған. Зерттеуде термомеханикалық CAES сияқты инновациялық тәсілдер қарастырылып, олардың Қазақстан үшін перспективалық бағыты ретінде көрсетіледі. Жұмыста зерттеу нәтижелері ұсынылып, негізгі кедергілер анықталып, оларды еңсеру бойынша шаралар ұсынылады. Мақала ұлттық және халықаралық дереккөздерге, модельдеуге және сараптамалық бағалауға негізделген және бұл салада ұлттық стратегия әзірлеуге негіз бола алады.

***Түйін сөздер:** CAES технологиясы, энергияны сақтау, жаңартылатын энергия көздері, сығылған ауа, компрессорлар.*

E.A. Tolekenov*, E.Ya. Shayakhmetov, R.A. Sovetbaev, G.M. Kudaibergenova

Shakarym University,
071412, Republic of Kazakhstan, Semey, Glinka Street, 20 A
*e-mail: yerassultol@gmail.com

PERSPECTIVES AND DESIGN OF COMPRESSED AIR ENERGY STORAGE SYSTEMS (CAES)

CAES technology combines mechanical and thermodynamic forms of energy storage. It can be scaled from local modular units to industrial-scale solutions. Its main advantages include high energy storage capacity, long operation time without recharging, integration potential with solar and wind power plants, and potentially low cost with mass deployment. As the share of renewable energy sources (RES) grows and the need to ensure the resilience of power systems increases, energy storage technologies are becoming strategically important. This paper presents a comprehensive analysis of compressed air energy storage (CAES) technology, including comparative evaluation with other storage systems, design features, advantages, and implementation challenges. Special attention is given to the potential of CAES application in the Republic of Kazakhstan, considering its climatic, geological, and economic conditions. The study explores innovative approaches, including thermomechanical CAES, as a promising direction for Kazakhstan. The work also presents research analysis results, identifies key barriers, and proposes measures to overcome them. The article is based on national and international sources, modeling, and expert assessments, and may serve as a foundation for shaping a national strategy for energy storage technology development.

Key words: CAES technology, energy storage, renewable energy sources, compressed air, compressors.

Сведения об авторах

Ерасыл Асембекович Толекенов* – магистрант кафедры «Цифровые технологии в машиностроении и логистика», Шәкәрім университет, Республика Казахстан; e-mail: yerassultol@gmail.com. ORCID: <https://orcid.org/0009-0009-9194-507X>.

Ержан Ярнарович Шаяхметов – PhD, старший преподаватель кафедры «Цифровые технологии в машиностроении и логистика», Шәкәрім университет, Республика Казахстан; e-mail: shaiakhmeterzh@mail.ru. ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-7986-0083>.

Раил Аянович Советбаев – заведующий кафедрой «Цифровые технологии в машиностроении и логистика», Шәкәрім университет, Республика Казахстан; e-mail: rsovetbayev@mail.ru. ORCID: <https://orcid.org/0009-0007-3605-515X>.

Гульнур Муратовна Кудайбергенова – магистр технических наук, преподаватель кафедры «Цифровые технологии в машиностроении и логистика», Шәкәрім университет, Республика Казахстан; e-mail: gulim88.88@bk.ru. ORCID: <https://orcid.org/0009-0002-3841-982X>.

Авторлар туралы мәліметтер

Ерасыл Асембекович Толекенов* – «Машина жасаудағы цифрлық технологиялар және логистика» кафедрасының магистранты, Шәкәрім университеті, Қазақстан; e-mail: yerassultol@gmail.com. ORCID: <https://orcid.org/0009-0009-9194-507X>.

Ержан Ярнарович Шаяхметов – PhD, «Машина жасаудағы цифрлық технологиялар және логистика» кафедрасының аға оқытушысы, Шәкәрім университеті, Қазақстан; e-mail: shaiakhmeterzh@mail.ru. ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-7986-0083>.

Раил Аянович Советбаев – «Машина жасаудағы цифрлық технологиялар және логистика» кафедрасының кафедра меңгерушісі, Шәкәрім университеті, Қазақстан; e-mail: rsovetbayev@mail.ru. ORCID: <https://orcid.org/0009-0007-3605-515X>.

Гульнур Муратовна Кудайбергенова – «Машина жасаудағы цифрлық технологиялар және логистика» кафедрасының аға оқытушысы, Шәкәрім университеті, Қазақстан; e-mail: gulim88.88@bk.ru. ORCID: <https://orcid.org/0009-0002-3841-982X>.

Information about the authors

Yerassyl Asembekovich Tolekenov* – Master's student of the «Digital Technologies in Machine Engineering and Logistics» Department; Shakarim University of Semey, JSC, Kazakhstan; e-mail: yerassultol@gmail.com. ORCID: <https://orcid.org/0009-0009-9194-507X>.

Erzhan Yarnarovich Shayakhmetov – PhD, Senior teacher of the «Digital Technologies in Machine Engineering and Logistics» Department; Shakarim University of Semey, Kazakhstan; e-mail: shaiakhmeterzh@mail.ru. ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-7986-0083>.

Rail Aianovich Sovetbaev – Head of Department the «Digital Technologies in Machine Engineering and Logistics» Department; Shakarim University of Semey, Kazakhstan; e-mail: rsovetbayev@mail.ru. ORCID: <https://orcid.org/0009-0007-3605-515X>.

Gulnur Muratovna Kudaibergenova – Senior teacher of the «Digital Technologies in Machine Engineering and Logistics» Department; Shakarim University of Semey, Kazakhstan; e-mail: gulim88.88@bk.ru. ORCID: <https://orcid.org/0009-0002-3841-982X>.

Поступила в редакцию 02.09.2025

Поступила после доработки 15.10.2025

Принята к публикации 16.10.2025