

Айбар Советбекұлы Кизатов – Д.Серікбаев атындағы Шығыс Қазақстан техникалық университетінің «Веритас» ғылыми-зерттеу орталығының ғылыми қызметкері, Өскемен қ., Қазақстан Республикасы; e-mail: akizatov@ektu.kz. ORCID: <https://orcid.org/0009-0004-6627-9742>.

Нүркен Парсаханұлы Мұсахан – Жаратылыстану ғылымдары, нанотехнологиялар және жаңа материалдар ҒЗИ ғылыми қызметкері, Қожа Ахмет Ясауи атындағы Халықаралық қазақ-түрік университеті, Түркістан қ., Қазақстан; e-mail: nurken.mussakhan@ayu.edu.kz. ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-4154-0356>.

Received 02.05.2025

Revised 03.06.2025

Accepted 04.06.2025

[https://doi.org/10.53360/2788-7995-2025-2\(18\)-52](https://doi.org/10.53360/2788-7995-2025-2(18)-52)

МРНТИ: 44.31.31



А.Қ. Құсаин*, А.Б. Касымов

Шәкәрім университет,

071412, Республика Казахстан, г. Семей, ул. Глинка, 20 А

*e-mail: olmeera853@gmail.com

ИССЛЕДОВАНИЕ ТЕПЛОФИЗИЧЕСКИХ СВОЙСТВ НАНОЖИДКОСТИ Al_2O_3 НА ОСНОВЕ СМЕСИ ЭТИЛЕНГЛИКОЛЯ И ВОДЫ (40:60) ДЛЯ ГЕОТЕРМАЛЬНОГО ПРИМЕНЕНИЯ

Аннотация: В данной работе представлены результаты экспериментального исследования теплофизических свойств наножидкости Al_2O_3 –ЭГ:вода в контексте ее применения в геотермальных тепловых насосах. Эксперимент проводился при температурах от 0 до 10 °С и концентрациях наночастиц 1, 3 и 5 об.%. Измерения показали, что при концентрации 1 об.% теплопроводность увеличивается на 8,2%, при 3 об.% – на 17,4%, а при 5 об.% – на 27% по сравнению с базовым раствором ЭГ:вода (40:60). Однако вязкость при 5 об.% возросла на 45%, что приводит к увеличению гидродинамических потерь. Оптимальная концентрация 3 об.% обеспечивает повышение теплопроводности на 17,4% при росте вязкости всего на 21%, что является компромиссом между эффективностью теплопередачи и насосными затратами. Вычисленный критерий эффективности (РЕС) подтверждает, что наилучший баланс достигается при 3 об.% Al_2O_3 , где $РЕС = 0,5$. Дальнейшие исследования должны учитывать влияние наночастиц на коррозию, долговременную стабильность и взаимодействие с элементами системы. Полученные результаты могут способствовать разработке более эффективных теплоносителей для геотермального отопления и снижения энергопотребления тепловых насосов.

Ключевые слова: геотермальная энергетика, наножидкость, теплопроводность, вязкость, Al_2O_3 , этиленгликоль, теплофизические свойства, тепловой насос.

Введение

Мировое потребление возобновляемой энергии значительно выросло за последние два десятилетия, достигшее объема 90,23 эксаджоулей в 2023 году [1]. Быстрыми темпами растет такой сектор возобновляемой энергетики как геотермальная энергетика, в основе которой лежит утилизация тепла из недр Земли. Количество установленной мощности геотермальных установок возросло с 14,4 ГВт [2] к 2020 году до 16,4 ГВт в 2023 году [3]. Геотермальная энергия как вид экологически чистой энергии имеет потенциал для удовлетворения некоторых основных мировых потребностей в энергии, замены ископаемого топлива и содействия сокращению выбросов парниковых газов [4-6].

Геотермальная энергия – это возобновляемый источник энергии, извлекаемой из внутреннего тепла Земли. Она добывается из подземных резервуаров горячей воды, пара или горячих сухих пород и может использоваться для производства электроэнергии, прямого отопления и промышленных целей. Низкотемпературная геотермальная энергия (низкопотенциальное тепло) относится к теплу, извлекаемому из подземных источников с температурой, как правило, ниже 150° С. Этот тип геотермальной энергии не подходит для традиционной выработки электроэнергии, но широко используется для прямого нагрева. Доля использования низкопотенциального тепла в геотермальной энергетике составляет весомый вклад на уровне 70 % [7, 8].

В Казахстане температура грунта на глубинах более 15 метров остается относительно стабильной в течение года, обычно находясь в диапазоне от 7°C до 15°C, в зависимости от конкретного местоположения и геологических условий [9]. В целях предотвращения замерзания в качестве теплоносителя используется этиленгликоль, либо смесь этиленгликоля и воды. Климат Казахстана относится резкоконтинентальному, чем обуславливается выбор водного раствора этиленгликоля с низкой температурой замерзания (до ~-25 °C).

Геотермальные тепловые насосы являются эффективным решением для рекуперации тепла в промышленности, коммерции и жилом секторе. Связи ростом цен на электроэнергию, повышение энергоэффективности тепловых насосов и снижение затрат становится особенно важным направлением. На эффективность в первую очередь влияет коэффициент полезного действия (КПД), который зависит от разницы температур между источником тепла (земля, воздух или вода) и радиатором (система отопления). Уменьшение этой разницы температур значительно повышает эффективность.

Наночастицы, диспергированные в теплоносителях, известных как наножидкости, могут значительно улучшить тепловые характеристики тепловых насосов за счет повышения эффективности теплопередачи. Например, авторами Yu W. et al. [10] выявлено увеличение теплопроводности наножидкости ZnO-ЭГ на 26,5 % по отношению к базовой жидкости. Авторами [11, 12] исследовалось проявление теплофизических свойств при добавлении Al₂O₃ в воду, смесь воды и этиленгликоля. Sundar L.S. et al. исследовал различную консистенцию базовой жидкости Вода-ЭГ и отметил максимальное увеличение теплопроводности наножидкости на 32% при соотношении Вода-ЭГ 20:80 [13]. Исследованы экспериментально и аналитически теплофизические свойства наножидкостей в контексте применения в геотермальной энергетике [14-17]. Помимо теплопроводности наножидкости, дисперсное состояние наножидкости обуславливает увеличение вязкости. Sundar L.S. et al. отметил увеличение динамической вязкости для разных соотношений базовой жидкости в пределах 1,37 - 2,4 раза в диапазоне 0-60 °C [13]. Hamid K.A. et al. выявил прирост Al₂O₃-Вода:ЭГ (в разных соотношениях Вода-ЭГ) в более чем 100% по сравнению с базовой жидкостью [18].

Исследование теплофизических свойств имеет важное значение для применения тепловых насосов, поскольку эти параметры определяют механизмы теплопередачи и гидродинамическое поведение, в конечном итоге влияя на общую эффективность системы.

В данной статье проведено исследование теплофизических свойств (теплопроводности и вязкости) наножидкости на основе наночастиц Al₂O₃, диспергированных в воде и растворе водном растворе этиленгликоля (40:60) в температурном диапазоне 0-10 °C.

Методы исследования

Al₂O₃ наночастицы были предоставлены компанией Sigma-Aldrich. Согласно указанным характеристикам, максимальный размер наночастиц Al₂O₃ составляет 50 нм. Количественный анализ наночастиц Al₂O₃ был выполнен с использованием энергодисперсионного спектрометра INCA Energy 250, установленного на растровом электронном микроскопе Jeol JSM-6390LV.

Наножидкость синтезировали по двухступенчатому методу, используя смесь этиленгликоля и бидистиллированной воды (ЭГ:Вода) в соотношении 40:60 в качестве базовой жидкости. Гомогенизация наножидкости была осуществлена с помощью ультразвукового диспергатора Scientz JY92-IIDN, обладающего мощностью 900 Вт и ультразвуковой частотой 20 кГц. Взвешивание наночастиц проводилось с использованием аналитических весов. Объемная концентрация наночастиц поддерживалась на уровне 3,4,5 %.

Теплопроводность измерялась с использованием прибора THW-L2, работающего по методу нестационарного горячего провода (Transient Hot Wire). Этот прибор предназначен для прямого измерения теплопроводности жидкостей и паст и соответствует стандарту ASTM D7896-19 (рис. 1). THW-L2 использует нестационарную методику измерений и короткое время тестирования, что позволяет минимизировать конвективные эффекты в образцах с различной вязкостью, обеспечивая точность измерений до 1 %. Для каждого значения температуры проводилась серия из пяти измерений. Температура наножидкости контролировалась с помощью EchoTherm Digital Electronic Chilling/Heating Dry Bath Series IC35, произведенного компанией Torrey Pines Scientific (США).



Рисунок 1 – Установка для определения теплопроводности наножидкости

Относительное изменение теплопроводности k_r определялось путем сравнения наножидкости с базовой жидкостью (ЭГ:Вода). Данное сравнение вычислялось по следующей формуле.

$$k_r = \frac{k_{nf} - k_{bf}}{k_{bf}} \cdot 100\%, \quad (1)$$

Динамическая вязкость измерялась с использованием ротационного вискозиметра фирмы Боун модель LVDV-2T. Измерения вязкости проводились в диапазоне температур 0-10 K, поддерживаемом чиллером Low-constant temp bath (модель DC-3010). Температурное равновесие между нагретой средой и наножидкостью внутри вискозиметра достигалось в течение 1 минуты, что подтверждалось повторяемостью результатов.

Относительное изменение динамической вязкости μ_r определялось путем сравнения наножидкости с базовой жидкостью. Это сравнение рассчитывалось по следующей формуле:

$$\mu_r = \frac{\mu_{nf} - \mu_{bf}}{\mu_{bf}} \cdot 100\% \quad (2)$$

Для каждого измерения при определенной температуре наножидкости стандартное отклонение остается ниже 0,0005 для измерений вязкости и ниже 0,0003 для оценки теплопроводности.

Результаты исследований и обсуждение

На рисунке 2 представлены результаты измерений теплопроводности наножидкости на основе частиц Al_2O_3 , диспергированных в базовой жидкости.

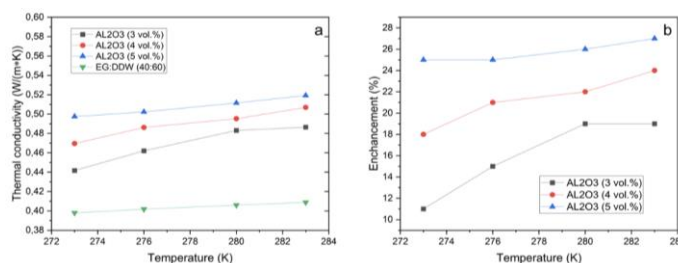


Рисунок 2 – Зависимость (а) коэффициент теплопроводности наножидкости Al_2O_3 -ЭГ:Вода и (б) увеличение коэффициента теплопроводности наножидкости Al_2O_3 -ЭГ:Вода по отношению к базовой жидкости (ЭГ:Вода). Оси подписаны на английском языке: по оси X отложена температура (K), по оси Y – коэффициент теплопроводности (Вт/(м·К) на графике (а) и повышение коэффициента теплопроводности (%) на графике (б).

Увеличение коэффициента теплопроводности отмечено для всех 3-х концентраций наночастиц. Например, для объемной концентрации 3% коэффициент теплопроводности увеличился с 0,442 Вт/(м·К) при 0 °C до 0,486 Вт/(м·К). Для 4 об.% наночастиц при 0 °C коэффициент составляет 0,470 °C, что на 6 % больше при той же температуре для 3 процентной концентрации. При температуре 7 °C Al_2O_3 -ЭГ:Вода (4 об.%) имеет коэффициент теплопроводности 0,495 Вт/(м·К). При той же температуре 5-и процентная наножидкость демонстрирует показатель теплопроводности на уровне 0,511 Вт/(м·К). Самый большой прирост теплопроводности на уровне 27 % выявлено для наножидкости Al_2O_3 -ЭГ:Вода (5 об.%) при температуре 10 °C и составляет 0,519 Вт/(м·К). Таким образом, среднее увеличение теплопроводности в разрезе концентраций выглядит следующим образом: 16% – для наножидкости Al_2O_3 -ЭГ:Вода (3 об.%), 21% – для наножидкости Al_2O_3 -ЭГ:Вода (4 об.%), 26% соответственно для 5 процентной концентрации наночастиц Al_2O_3 .

Рисунок 3 отражает результаты исследований динамической вязкости наножидкости Al_2O_3 -ЭГ:Вода. Наименьшее увеличение динамической вязкости наножидкости наблюдается при температуре 10 °C для наножидкости Al_2O_3 -ЭГ:Вода (3 об.%) на уровне 22 % и составляет 5,136 сП. При уменьшении температуры наножидкости до 0 °C увеличение 30 %. 4-х процентная наножидкость при 0 °C показывает увеличение динамической вязкости на 5 % больше по отношению к Al_2O_3 -ЭГ:Вода (3 об.%) и составляет 7,695 сП. Максимальное значение вязкости отмечено у наножидкости Al_2O_3 -ЭГ:Вода (5 об.%), составляющее увеличение на 45 % по отношению к базовой жидкости.

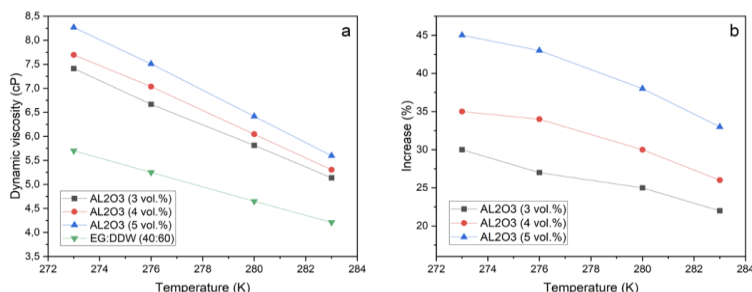


Рисунок 3 – Зависимость (а) динамической вязкости и (b) относительного повышения динамической вязкости наножидкостей Al_2O_3 с различной объемной концентрацией от температуры. Оси подписаны на английском языке: по оси X отложена температура (K), по оси Y – коэффициент динамической вязкости (сП) на графике (а) и повышение (%) на графике (b)

Передача энергии от одной молекулы к другой осуществляется за счёт межмолекулярного взаимодействия и колебаний атомов в жидкости. При введении наночастиц образуются дополнительные пути переноса энергии за счёт локального увеличения теплопроводности твёрдых частиц. Помимо локального увеличения теплопроводности твердых частиц, важное значение имеет их дисперсное состояние. уменьшение размеров частиц приводит к увеличению их удельной поверхности, что способствует более эффективному теплообмену с окружающей жидкостью. Наночастицы быстро прогреваются, что снижает термическое сопротивление системы.

При повышении температуры вязкость уменьшается из-за ослабления межмолекулярных взаимодействий и увеличения подвижности частиц. Но также отмечена тенденция к агрегации наночастиц и образования кластеров с повышением концентрации наночастиц.

Выводы

Добавление наночастиц Al_2O_3 в теплоноситель представляет собой перспективное направление для повышения эффективности тепловых насосов. Увеличение теплопроводности способствует более быстрому и равномерному распределению тепла в контуре, снижая тепловые потери и повышая коэффициент полезного действия системы. В частности, использование наножидкостей может улучшить теплообмен между грунтовым контуром и теплоносителем, что особенно важно при применении геотермальных тепловых насосов.

Результаты показывают, что использование наночастиц Al_2O_3 в составе наножидкости на основе смеси ЭГ:Вода приводит к значительному увеличению теплопроводности, что положительно сказывается на теплообменных характеристиках. Однако повышение вязкости, особенно при низких температурах, может привести к увеличению гидродинамического сопротивления в системах теплообмена. Следовательно, выбор оптимальной концентрации наночастиц требует компромисса между увеличением теплопроводности и приемлемым уровнем вязкости для практического применения в теплотехнических системах.

Список литературы

1. Statista. Global geothermal power capacity 2009-2023 [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://www.statista.com/statistics/476281/global-capacity-of-geothermal-energy/>, свободный. – (Дата обращения: 05.03.2025).

2. IRENA. Global geothermal market and technology assessment [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://www.irena.org/Publications/2023/Feb/Global-geothermal-market-and-technology-assessment>, свободный. – (Дата обращения: 05.03.2025).
3. ThinkGeoEnergy. ThinkGeoEnergy's top 10 geothermal countries 2023 – power generation capacity [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://www.thinkgeoenergy.com/thinkgeoenergys-top-10-geothermal-countries-2023-power-generation-capacity>, свободный. – (Дата обращения: 05.03.2025).
4. Liu X. A systematic study of harnessing low-temperature geothermal energy from oil and gas reservoirs / X. Liu, G. Falcone, C. Alimonti // Energy. – 2018. – Т. 142. – P. 346-355.
5. Kamila Z. Reinjection in geothermal fields: An updated worldwide review 2020 / Z. Kamila, E. Kaya, S.J. Zarrouk // Geothermics. – 2021. – Т. 89. – P. 101970.
6. Igwe C.I. Geothermal energy: a review / C.I. Igwe // Int. J. Eng. Res. Technol.(IJERT). – 2021. – Т. 10. – P. 655-661.
7. Nian Y.L. Insights into geothermal utilization of abandoned oil and gas wells / Y.L. Nian, W.L. Cheng // Renewable and Sustainable Energy Reviews. – 2018. – Т. 87. – P. 44-60.
8. Enhancing geothermal power generation from abandoned oil wells with thermal reservoirs / W.L. Cheng et al // Energy. – 2016. – Т. 109. – P. 537-545.
9. Experimental and theoretical investigations of a ground source heat pump system for water and space heating applications in Kazakhstan / Y. Yerdesh et al // Energies. – 2022. – Т. 15, № 22. – P. 8336.
10. Investigation of thermal conductivity and viscosity of ethylene glycol based ZnO nanofluid / W. Yu et al // Thermochimica Acta. – 2009. – Т. 491, № 1-2. – P. 92-96.
11. An experimental determination of thermal conductivity and electrical conductivity of bio glycol based Al₂O₃ nanofluids and development of new correlation / A.M. Khdher et al // International Communications in Heat and Mass Transfer. – 2016. – Т. 73. – P. 75-83.
12. Gangwar J. et al. Strong enhancement in thermal conductivity of ethylene glycol-based nanofluids by amorphous and crystalline Al₂O₃ nanoparticles / J. Gangwar et al // Applied Physics Letters. – 2014. – Т. 105. – №. 6.
13. Thermal conductivity and viscosity of stabilized ethylene glycol and water mixture Al₂O₃ nanofluids for heat transfer applications: An experimental study / L.S. Sundar et al // International Communications in Heat and Mass Transfer. – 2014. – Т. 56. – P. 86-95.
14. Peng H. Influences of refrigerant-based nanofluid composition and heating condition on the migration of nanoparticles during pool boiling. Part II: model development and validation / H. Peng, G. Ding, H. Hu // International journal of refrigeration. – 2011. – Т. 34, № 8. – P. 1833-1845.
15. Kapicioglu A. Energy and exergy analysis of a ground source heat pump system with a slinky ground heat exchanger supported by nanofluid / A. Kapicioglu // Journal of Thermal Analysis and Calorimetry. – 2021. – P. 1-14.
16. Tarodiya R. A study on utilization of ground source energy for space heating using a nanofluid as a heat carrier / R. Tarodiya, V. Verma, S. Thangavel // Heat Transfer. – 2021. – Т. 50, № 4. – P. 3842-3860.
17. Tetiana R. The Efficiency of Nanofluid Use in the Heat Supply System of a House with a Geothermal Heat Pump / R. Tetiana, K. Myroslava, S. Ivan // 2021 IEEE 11th International Conference Nanomaterials: Applications & Properties (NAP). – IEEE, 2021. – P. 1-4.
18. Investigation of Al₂O₃ nanofluid viscosity for different water/EG mixture based / K.A. Hamid et al // Energy Procedia. – 2015. – Т. 79. – P. 354-359.

А.Қ. Құсаин*, А.Б. Касымов

Шәкәрім университет,

071412, Қазақстан Республикасы, Семей қ., Глинка, 20А

*e-mail: olmeera853@gmail.com

Al₂O₃–ЭГ:СУ ГЕОТЕРМАЛДЫҚ ҚОЛДАНУҒА АРНАЛҒАН НАНОСҰЙЫҚТІНІҢ ЖЫЛУФИЗИКАЛЫҚ ҚАСИЕТТЕРІН ЗЕРТТЕУ

Бұл жұмыс геотермалдық жылу сорғыларына арналған Al₂O₃–ЭГ:су наносұйықтығының жылу-физикалық қасиеттерін эксперименттік зерттеу нәтижелерін ұсынады. Эксперимент 0-10 °С аралығындағы температураларда және 1, 3 және 5 көлемдік % нанобөлшек концентрацияларында

жүргізілді. Нәтижелер көрсеткендей, 1 көлемдік % концентрацияда жылуөткізгіштік 8,2%-ға, 3% – 17,4%-ға, 5% – 27%-ға артқан, ал 5% концентрацияда тұтқырлық 45%-ға жоғарылаған, бұл гидродинамикалық шығындардың ұлғаюына әкелді. 3% концентрация жылуөткізгіштікті 17,4%-ға арттыра отырып, тұтқырлықты тек 21%-ға ұлғайтады, бұл жылу тасымалдау тиімділігі мен насос шығындары арасындағы оңтайлы балансқа қол жеткізеді. Есептелген тиімділік коэффициенті (PEC) бойынша 3% Al_2O_3 концентрациясында $PEC = 1,23$ ең жоғары мәнге жетеді. Келешекте зерттеулер нанобөлшектердің коррозияға, ұзақ мерзімді тұрақтылыққа және жүйе элементтерімен өзара әрекеттесуіне әсерін зерттеуді қажет етеді. Алынған нәтижелер геотермалдық жылыту үшін тиімдірек жылу тасымалдағыштарды әзірлеуге және жылу сорғыларының энергопайдалануын азайтуға көмектесуі мүмкін.

Түйін сөздер: геотермалдық энергетика, наносұйықтық, жылуөткізгіштік, тұтқырлық, Al_2O_3 , этиленгликоль, жылу-физикалық қасиеттер, жылу сорғысы.

A.K. Kusain*, A.B. Kassymov

Shakarim University,

071412, The Republic of Kazakhstan, Semey, st. Glinka, 20A

*e-mail: olmeera853@gmail.com

STUDY OF THERMOPHYSICAL PROPERTIES OF Al_2O_3 -EG:WATER NANOFLUID FOR GEOTHERMAL APPLICATION

This work presents the results of experimental investigation of the thermophysical properties of Al_2O_3 -EG:water nanofluid for its application in geothermal heat pumps. The experiment was conducted at temperatures ranging from 0 to 10 °C and nanoparticle concentrations of 1, 3, and 5 vol.%. The results showed that at 1% concentration, thermal conductivity increased by 8.2%, at 3% – by 17.4%, and at 5% – by 27%, compared to the base EG:water (60:40) solution. However, at 5% concentration, viscosity increased by 45%, leading to higher hydrodynamic losses. The optimal concentration of 3% increases thermal conductivity by 17.4% while raising viscosity by only 21%, providing a balance between heat transfer efficiency and pumping costs. The calculated performance evaluation criterion (PEC) confirms that the best balance is achieved at 3% Al_2O_3 , where $PEC = 1.23$. Further research should investigate the impact of nanoparticles on corrosion, long-term stability, and interaction with system components. The obtained results may contribute to the development of more efficient heat transfer fluids for geothermal heating and reduction of energy consumption in heat pumps.

Key words: geothermal energy, nanofluid, thermal conductivity, viscosity, Al_2O_3 , ethylene glycol, thermophysical properties, heat pump.

Сведения об авторах

Альмира Қайрболатқызы Құсаин* – магистрант образовательной программы 7M07101 «Теплоэнергетика» кафедры «Техническая физика и теплоэнергетика»; Шәкәрім университет, Республика Казахстан; e-mail: olmeera853@gmail.com.

Аскар Багдатович Касымов – PhD, Член Правления-Проректор по стратегии и социальному развитию; Шәкәрім университет, Республика Казахстан; e-mail: askar.kassymov@shakarim.kz. ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-1983-6508>.

Авторлар туралы мәліметтер

Альмира Қайрболатқызы Құсаин* – 7M07101 «Жылу энергетикасы» білім беру бағдарламасының магистранты, «Техникалық физика және жылуэнергетика» кафедрасы; Шәкәрім университеті, Қазақстан Республикасы; e-mail: olmeera853@gmail.com.

Аскар Багдатович Касымов – PhD, Басқарма мүшесі-стратегия және әлеуметтік даму жөніндегі проректор; Шәкәрім университеті, Қазақстан Республикасы; e-mail: askar.kassymov@shakarim.kz. ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-1983-6508>.

Information about the authors

Almira Kairbolatkyzy Kusain* – Master's student of the 7M07101 «Heat Power Engineering» educational program, Department of «Technical Physics and Heat Power Engineering»; Shakarim University, Republic of Kazakhstan; e-mail: olmeera853@gmail.com.

Askar Bagdatovich Kassymov – PhD, Member of the Board – Vice-Rector for Strategy and Social Development; Shakarim University, Republic of Kazakhstan; e-mail: askar.kassymov@shakarim.kz. ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-1983-6508>.

Поступила в редакцию 05.04.2025

Поступила после доработки 21.04.2025

Принята к публикации 22.04.2025