

УДК 621.592.2:658.5

Технико-экономический анализ блока зарядки криогенного аккумулятора энергии, работающего по циклу Гейландта

Канд. техн. наук Е. В. БЛАГИН, д-р техн. наук Д. А. УГЛАНОВ*,
Е. М. БИТЕРЯКОВА, В. В. КАЗАНДАЕВ, И. С. ПАВЛИХИН

Самарский государственный аэрокосмический университет им. академика С. П. Королева

*E-mail: uglanov.da@ssau.ru

В статье представлен детальный технико-экономический анализ криогенного аккумулятора энергии, работающего по циклу Гейландта. На основе разработанной математической модели, включающей уравнения теплового баланса теплообменников, работы компрессора и детандера, определены оптимальные параметры системы. Модель учитывает коэффициенты теплопередачи и термодинамические свойства рабочего тела. Расчеты проводились с шагом по давлению 1 бар и шагом по параметру M 0,05. Установлено, что при доле отводимого рабочего тела $M = 0,7$ и давлении 51 бар достигаются минимальные удельные энергозатраты 0,1272 кВт при стоимости оборудования 5047,8 \$. Проведенный сравнительный анализ с циклом Линде выявил ключевые преимущества схемы Гейландта в диапазоне средних давлений (50–300 бар). Особое внимание уделено исследованию влияния параметра M на эффективность системы — показано, что его увеличение свыше 0,7 приводит к снижению общего КПД. Экономическая оценка выполнена с использованием современных моделей расчета стоимости: для компрессора, теплообменников и детандера. Результаты включают: 1 — графики зависимости энергопотребления и стоимости от давления; 2 — фронт Парето для многокритериальной оптимизации; 3 — таблицу оптимальных параметров ($M = 0,7$, $P = 51$ бар); 4 — сравнительные характеристики с циклом Линде. Основной вывод исследования: цикл Гейландта демонстрирует лучшие показатели энергоэффективности в области средних давлений (50–100 бар), обеспечивая на 12–15 % меньшие энергозатраты по сравнению с традиционными решениями. Полученные результаты имеют практическую значимость для проектирования промышленных криогенных систем хранения энергии, особенно в комбинации с возобновляемыми источниками.

Ключевые слова: криогенный аккумулятор, цикл Гейландта, технико-экономический анализ, оптимизация, детандер, криогенные системы, энергоэффективность.

Информация о статье:

Поступила в редакцию 13.05.2025, одобрена после рецензирования 24.09.2025, принята к печати 26.09.2025

DOI: 10.17586/1606-4313-2025-24-4-13-18

Язык статьи — русский

Для цитирования:

Благин Е. В., Угланов Д. А., Битерякова Е. М., Казандаев В. В., Павлихин И. С. Технико-экономический анализ блока зарядки криогенного аккумулятора энергии, работающего по циклу Гейландта. // Вестник Международной академии холода. 2025. № 4. С. 13–18. DOI: 10.17586/1606-4313-2025-24-4-13-18

Cryogenic energy storage system operating on the Heylandt cycle: technical and economic analysis

Ph. D. E. V. BLAGIN, D. Sc. D. A. UGLANOV*, E. M. BITERYAKOVA,
V. V. KAZANDAEV, I. S. PAVLIKHIN

Samara National Research University named after Academician S. P. Korolev

*E-mail: uglanov.da@ssau.ru

The article presents a detailed techno-economic analysis of a cryogenic energy storage system operating on the Heylandt cycle. Based on a developed mathematical model that includes heat balance equations for heat exchangers, compressor work, and expander performance, an optimal system of parameters was determined. The model accounts for heat transfer coefficients and thermodynamic properties of the working fluid. Calculations were performed with pressure increments of 1 bar and parameter M increments of 0.05. It was established that with a working fluid diversion fraction of $M = 0.7$ and pressure of 51 bar, minimal specific energy consumption of 0.1272 kW is achieved at an equipment cost of \$5,047.8. A comparative analysis with the Linde cycle revealed key advantages of the Heylandt scheme in the medium pressure range (50–300 bar). Particular attention was paid to studying the influence of parameter M on system efficiency — it was shown

that increasing it beyond 0.7 leads to reduced overall efficiency. The economic assessment employed modern cost calculation models for the compressor, heat exchangers, and expander. The results include: 1 — graphs of energy consumption and cost versus pressure; 2 — Pareto front for multi-criteria optimization; 3 — a table of optimal parameters ($M = 0.7$, $P = 51$ bar); 4 — comparative characteristics with the Linde cycle. The main conclusion is as follows: the Heylandt cycle demonstrates superior energy efficiency in the medium pressure range (50–100 bar), providing 12–15% lower energy consumption compared to traditional solutions. The obtained results have practical significance for designing industrial cryogenic energy storage systems, particularly in combination with renewable energy sources.

Keywords: cryogenic energy storage, Heylandt cycle, techno-economic analysis, optimization, expander, cryogenic systems, energy efficiency.

Article info:

Received 13/05/2025, approved after reviewing 24/09/2025, accepted 26/09/2025

DOI: 10.17586/1606-4313-2025-24-4-13-18

Article in Russian

For citation:

Blagin E. V., Uglanov D. A., Biteryakova E. M., Kazandaev V. V., Pavlikhin I. S.. Cryogenic energy storage system operating on the Heylandt cycle: technical and economic analysis. *Journal of International Academy of Refrigeration*. 2025. No 4. p. 13-18. DOI: 10.17586/1606-4313-2025-24-4-13-18

Введение

В последние годы возобновляемые источники энергии получают всё более широкое распространение. Однако их существенным недостатком является нестабильность выработки электроэнергии. Кроме того, потребление энергии в электросетях также неравномерно в течение суток. В связи с этим возникает необходимость в хранении больших объемов электроэнергии для сглаживания неравномерности выработки и потребления. Решить эту проблему позволяют системы аккумулирования энергии, в частности, криогенные аккумуляторы.

В работе [1] рассмотрена работа криогенного аккумулятора, использующего цикл Капицы для сжижения воздуха. Для повышения эффективности работы автор предлагает использовать абсорбер для водно-бромистого раствора лития. Результаты исследования показывают, что в таком случае можно достичь значения удельного энергопотребления 425,52 кВт/ч, эксергетического КПД 17,95%, что на 10,92% выше, чем у прототипа.

В работе [2] произведена оценка сравнительная оценка экологических характеристик криогенного аккумулятора, использующего цикл Капицы, и литий-ионных аккумуляторов, показывающая, что несмотря на большую экологичность литий-ионных аккумуляторов, криогенный аккумулятор имеет преимущество в виде побочного продукта — холода. Наибольшее влияние на экологичность криогенного аккумулятора оказывает используемый в нем теплоноситель и среда для хранения тепловой энергии.

В работе [3] рассмотрен способ повышения экономической эффективности синтеза аммиака путем интеграции в установку криогенного аккумулятора. Результаты исследования показывают, что в таком случае эксплуатационные расходы упадут приблизительно на 38%, а первоначальные инвестиции на 11,3%.

В работе [4] представлена установка, работающая по циклу Линде, с использованием воздушного цикла Ренкина. Добавление цикла Ренкина повысило эффективность установки с 54,1% до 57,1%, а также повысило выход жидкого воздуха с 86% до 90,7% за счет снижения температуры воздуха на входе в теплообменник.

В работе [5] проведен сравнительный термодинамический анализ и оценка производительности различных конфигураций сжижения газа. Было исследовано влияние на эффективность работы криогенного аккумулятора таких параметров, как давление сжатия, количество ступеней сжатия, коэффициент расхода детандера, температуры рабочего тела на входе и температуры кипения рабочего тела.

В работе [6] рассматривается максимально доступный прирост эффективности работы криогенного аккумулятора по сравнению с наиболее эффективными конфигурациями, представленными в литературе. При использовании криогенного аккумулятора, который использует полный внутренний теплообмен и включает в себя органический цикл Ренкина в качестве дополнительной системы рекуперации тепла можно получить прирост эффективности от 61,7% до 64,3%.

В работе [7] рассмотрено улучшение эффективности работы криогенного аккумулятора, работающего по циклу Линде, за счет использования двигателя Стирлинга, использующего в качестве источника тепла солнечную энергию или тепло от сжатия. Благодаря этому методу эффективность установки повышается на 8,96% при использовании СПГ.

В работе [8] рассматривается использование углекислого газа вместо воздуха в качестве рабочего тела в криогенном аккумуляторе, работающем по циклу Линде, что позволяет повысить эффективность цикла с 46,3% до 50%.

В работе [9] рассматривается работа криогенного аккумулятора, использующего цикл Линде и совмещенного с электростанцией, работающей на природном газе. Это позволяет при давлении на входе 12 МПа повысить эффективность установки до 47,58%.

В работе [10] предложено использование криогенного аккумулятора, работающего по циклу Линде, в АЭС. Данная установка поможет сбалансировать возобновляемые источники энергии, так как количество производимой ими электроэнергии не всегда может соответствовать спросу. Это позволяет получить КПД до 59,96%. Кроме того, это позволяет повысить экономическую эффектив-

ность за счет того, что часть энергии, которая должна была быть выброшена, сохраняется в форме, пригодной для использования.

Анализ современных публикаций подтверждает высокую актуальность исследований в данной области. Однако существующие работы не предлагают комплексных алгоритмов многокритериальной оптимизации, учитывающих одновременно энергетические и экономические показатели. Разработка таких методов представляет значительный научный и практический интерес, что определяет актуальность данного исследования. В данной работе проведена оптимизация ожижителя, работающего по циклу Гейландта.

Оптимизация ожижителя по циклу Гейландта

1. Описание установки ожижителя по циклу Гейландта

Газ сжимается в компрессоре до давления 20 МПа (линия 1–2), затем разделяется на два потока. Одна часть (M) направляется в детандер, расширяется в нем до давления 0,1 МПа с производством внешней работы (линия 2–3), охлаждается и поступает в теплообменник I, где отдает свой холод другой части сжатого воздуха, поступающего из компрессора (линия 3–8). Эта часть воздуха (1 – M), охлажденная в теплообменнике I (линия 2–4), поступает в теплообменник 2, где охлаждается дросселированным воздухом (линия 4–5), а затем подводится к дроссельному вентилю, где дросселируется до давления 0,1 МПа, частично сжижаясь (линия 5–6), и собирается в сепараторе. Сконденсировавшийся газ отводится потребителю (точка 0). Образующиеся при дросселировании пары газа поступают в теплообменник 2, охлаждая поток сжатого газа (линия 7–3).

2. Математическая модель ожижителя

В табл. 1, 2 представлены исходные данные для расчета.

Таблица 1

Свойства азота

Table 1

Nitrogen properties

R, кДж/кмоль	8,314
μ, моль/кг	28,01
η _{из}	0,6
η _{дет}	0,8

Таблица 2

Исходные данные для расчета

Table 2

Initial data for calculation

Минимальное расчетное давление p ₂ , бар	50
Максимальное расчетное давление p ₂ , бар	300
Шаг по давлению, бар	1
Минимальная расчетная часть азота, отводимая на детандер M	0
Максимальная расчетная часть азота, отводимая на детандер M	1
Шаг по части азота, отводимой на детандер	0,05
Производительность жидкого азота, л/сут	10

Энтальпия в точке 3:

$$h_3 = h_2 - (h_2 - h'_2)\eta_{дет}.$$
 (1)

Тепловой баланс теплообменников:

$$(h_2 - h_4)(1 - M) = (h_8 - h_3)[(1 - y)(1 - M) + M];$$
 (2)

$$(h_4 - h_5)(1 - M) = (h_3 - h_7)(1 - y)(1 - M);$$
 (3)

$$h_5 = y \cdot h_0 + (1 - y)h_7.$$
 (4)

Работа компрессора:

$$L_k = R \cdot T \cdot \ln \left(\frac{P_2}{P_1} \right).$$
 (5)

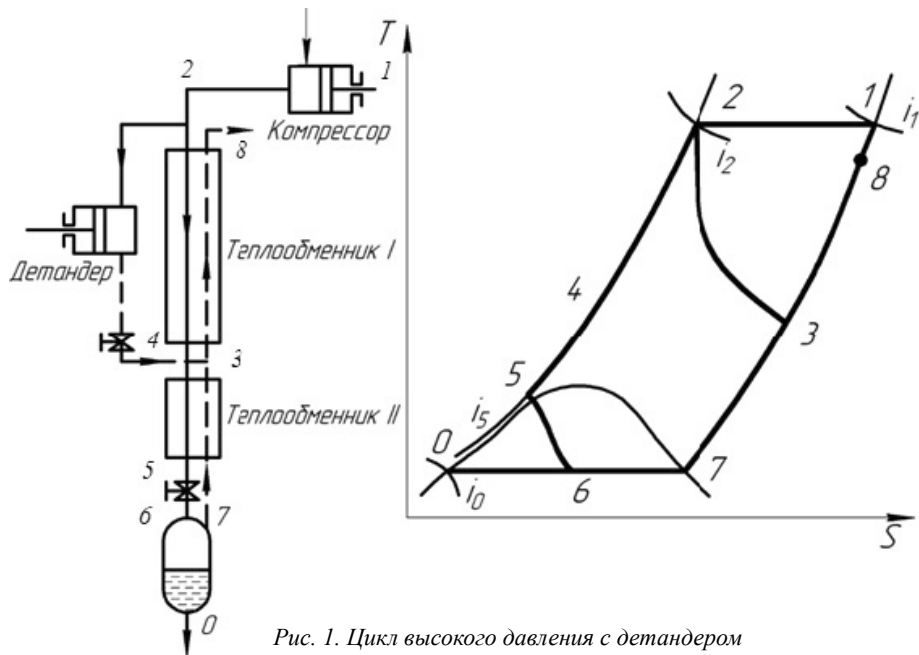


Рис. 1. Цикл высокого давления с детандером

Fig. 1. High-pressure cycle with a detander

Действительная работа сжатия газа выражается уравнением:

$$L = \frac{L_k}{\eta_{из}}. \quad (6)$$

Работа детандера:

$$L_d = M(h_2 - h_3). \quad (7)$$

Абсолютные затраты энергии:

$$Q_0 = L_k - L_d. \quad (8)$$

Удельные затраты энергии:

$$N_{уд} = \frac{Q_0}{3600 \cdot \beta}. \quad (9)$$

На следующем этапе расчета требуется определить коэффициенты теплопередачи в теплообменном аппарате. В данном вычислении не рассчитываются непосредственно теплообменные аппараты, используемые в криогенной силовой установке. Коэффициент теплопередачи для жидкости находится в диапазоне значений 500...4500 Дж/(м²·К), в данном расчете для жидкости условно примем равным 1000 Дж/(м²·К), для воздушной среды находится в диапазоне 50...270 Дж/(м²·К), условно примем его равным 200 Дж/(м²·К).

Коэффициент теплопередачи для нагрева и охлаждения газообразной среды

$$K = 200 \text{ Дж/(м}^2 \cdot \text{К)}.$$

Среднетемпературный напор по участкам найден по следующим формулам:

$$dT_1 = \frac{(T_2 - T_4) - (T_3 - T_8)}{\ln \left(\frac{T_2 - T_4}{T_3 - T_8} \right)}; \quad (10)$$

$$dT_2 = \frac{(T_4 - T_5) - (T_7 - T_3)}{\ln \left(\frac{T_4 - T_5}{T_7 - T_3} \right)}. \quad (11)$$

Необходимая площадь наружной поверхности теплообмена на участках определяется по формуле:

$$F_1 = \frac{Q}{K \cdot dT_1}; \quad (12)$$

$$F_2 = \frac{Q}{K \cdot dT_2}. \quad (13)$$

Затем был проведен экономический анализ с использованием модели, предложенной Fang [13], для оценки стоимости компрессора и модели Abdolalipouradl [14] для оценки стоимости теплообменников и детандера.

Стоимость теплообменника аппаратов:

$$ZT_1 = \left[130 \left(\frac{F_1}{0,093} \right)^{0,78} \right] 1000; \quad (14)$$

$$ZT_2 = \left[130 \left(\frac{F_2}{0,093} \right)^{0,78} \right] 1000. \quad (15)$$

Стоимость компрессора определяется по формуле:

$$ZC = 10167,5 \cdot W^{0,46}. \quad (16)$$

Стоимость детандера определяется по формуле:

$$ZN = 6000 \cdot W^{0,7}. \quad (17)$$

Общая стоимость криогенной установки:

$$Z = ZC + ZT_1 + ZT_2 + ZN. \quad (18)$$

3. Результаты анализа

Фронт Парето для ожижителей, работающих по циклу Линде, а также зависимость потребляемой мощности от давления на выходе из компрессора представлены на рис. 2–4.

Анализ зависимостей показывает, что в отличие от цикла Линде увеличение давления не приводит к однозначному увеличению эффективности установки, так как кроме затрачиваемой работы появляется второй фактор — отвод части рабочего тела на детандер. Это кардинально меняет картину и теперь наиболее эффективной

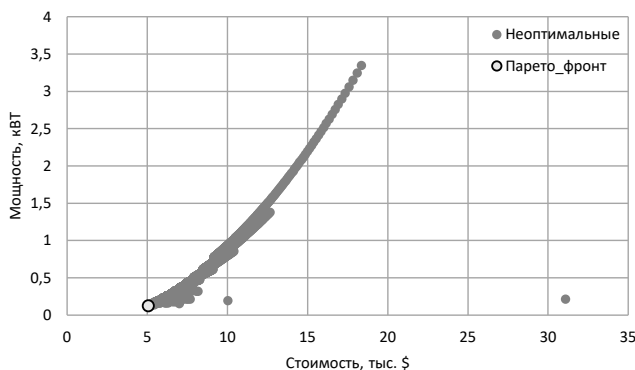


Рис. 2. Фронт Парето для ожижителей, работающих по циклу Гейландта

Fig. 2. Pareto front for fluidisers operating on the Heylandt cycle

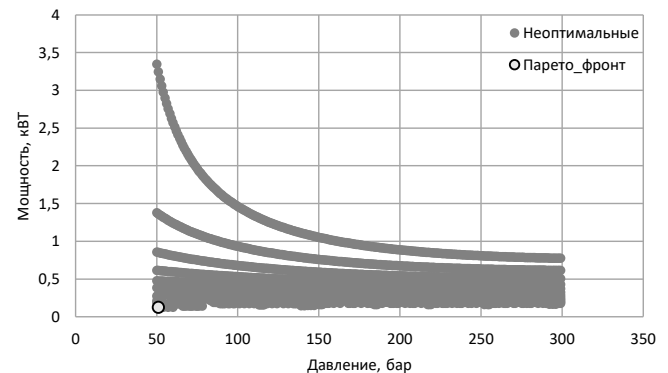


Рис. 3. Зависимость потребляемой мощности ожижителя от давления на выходе из компрессора

Fig. 3. Dependence of the power consumption of the liquefier on the pressure at the compressor outlet

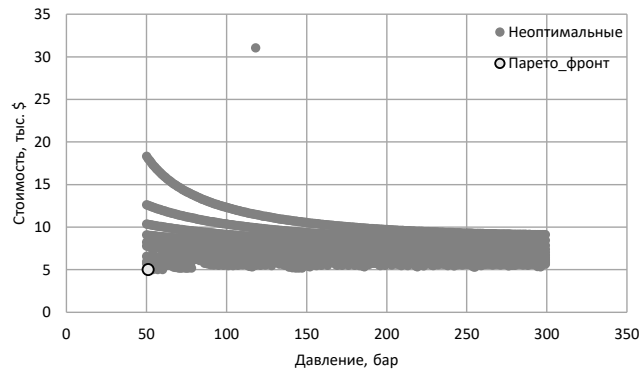


Рис. 4. Зависимость стоимости ожижителя от давления на выходе из компрессора

Fig. 4. Dependence of the cost of the liquefier on the pressure at the compressor outlet

с точки зрения технико-экономического анализа будет установка с относительно небольшим давлением (50 бар), что фактически переносит её в область циклов ожижения среднего давления (Клода).

Параметры для наиболее эффективной с точки зрения технико-экономического анализа конфигурации представлены в табл. 3.

Таблица 3

Параметры оптимальной конфигурации

Optimal configuration parameters			
<i>M</i>	<i>N</i> , кВт	<i>Z</i> , тыс. \$	<i>P</i> , МПа
0,7	0,1272	5,0478	5,1

Заключение

Проведенное исследование криогенного аккумулятора на основе цикла Гейландта позволило выявить ключевые особенности его работы и определить оптимальные параметры функционирования. В ходе анализа установлено, что в отличие от классического цикла Линде, увеличение давления в системе не приводит к пропорциональному росту эффективности из-за влияния параметра отбора рабочего тела ($M = 0,7$). Это обуславливает особый характер зависимостей рабочих параметров и сближает характеристики системы с циклами среднего давления.

Математическое моделирование и технико-экономический анализ показали, что оптимальная конфигурация установки достигается при давлении 51 бар, обеспечивая удельные энергозатраты 0,1272 кВт при стоимости оборудования 5,0478 тыс. \$. Такие параметры демонстрируют баланс между энергетической эффективностью и экономической целесообразностью системы.

Сравнительный анализ с циклом Линде подтвердил, что использование детандера и разделение потока рабочего тела кардинально меняет зависимость эффективности от давления, что требует особого подхода к проектированию подобных систем.

Ключевое преимущество цикла Гейландта заключается в устойчивой работе при умеренных давлениях и гибкости регулирования параметров за счет управления

долей отводимого рабочего тела. Это делает его особенно ценным для применений, где критически важны стабильность работы и адаптивность к изменяющимся нагрузкам.

Таким образом, цикл Гейландта представляет собой эффективное техническое решение для криогенных систем среднего давления, нашедшее применение в промышленных установках и системах хранения энергии. Перспективными направлениями для дальнейшего совершенствования данной технологии являются оптимизация параметров детандера и повышение эффективности теплообменных процессов, что позволит снизить энергопотребление системы при сохранении ее эксплуатационных преимуществ.

Результаты работы получены при финансовой поддержке Минобрнауки России (проект № FSSS-2024-0017).

Литература/ References

1. Borri E., Tafone A., Comodi G., Romagnoli A. Improving liquefaction process of microgrid scale Liquid Air Energy Storage (LAES) through waste heat recovery (WHR) and absorption chiller. *Energy Procedia*. 2017. vol. 143. p. 699–704. DOI: 10.1016/j.egypro. 2017.12.058.

2. Tafone A., Borri E., Cabeza L. F., Romagnoli A. Environmental performance of a multi-energy liquid air energy storage (LAES) system in cogeneration asset — A life cycle assessment-based comparison with lithium ion (Li-ion) battery. *Energy Reports*. 2024. vol. 10. no 20. p. e39193. DOI: 10.1016/j.egyr. 2024.05.024.

3. Tongtong Zhang, Xiaohui She, Binjian Nie, et all. Integration of liquid air energy storage with ammonia synthesis process for resource efficiency and cost-effectiveness. *Energy*. 2024. vol. 97. Iss. A. p. 112637. DOI: 10.1016/j. energy. 2024.112637.

4. Menezes M., Vilasboas I., Silva J. A. M. Liquid Air Energy Storage System (LAES) Assisted by Cryogenic Air Rankine Cycle (ARC). *Energies*. 2022. vol. 15. no 8. p. 2730. DOI: 10.3390/en15082730.

5. Muhsin Kılıç, Ayse Fidan Altun. Comprehensive Thermodynamic Performance Evaluation of Various Gas Liquefaction Cycles for Cryogenic Energy Storage. *Sustainability (Switzerland)*. 2023. vol. 15. no 24. p. 16906. DOI: 10.3390/su152416906.

6. Carraro G., Danieli P., Boatto T., Lazzaretto A. Conceptual review and optimization of liquid air energy storage system configurations for large scale energy storage. *Journal of Energy Storage*. 2023. vol. 72. Iss. B. p. 108225. DOI: 10.1016/j. est. 2023.108225.

7. Siyue Ren, Truls Gundersen, Zhongxuan Liu, Xiao Feng. Performance improvement of liquid air energy storage: Introducing Stirling engine and solar energy. *Energy Conversion and Management*. 2023. Vol. 296. p. 117666. DOI: 10.1016/j. enconman. 2023.117666.

8. Matteo Marchionni, Roberto Cipollone. Liquid CO₂ and Liquid Air Energy Storage Systems: A Thermodynamic Analysis. *Energies*. 2023. vol. 16. no 13. p. 4941. DOI: 10.3390/en16134941.

9. Xiaoqiao Qin, Hongbo Tan, Na Wen, Weiming Liu. Thermodynamic and Economic Analysis of a Liquid Air Energy Storage System with Carbon Capture and Storage for Gas Power Plants. *Applied Sciences (Switzerland)*. 2023. vol. 13. no 17. p. 9559. DOI: 10.3390/app13179559.

10. Seok-Ho Song, Jin-Young Heo, Jeong Ik Lee. Design considerations for the liquid air energy storage system integrated to nuclear steam cycle. *Applied Sciences (Switzerland)*. 2021. vol. 11. no 18. p. 8484. DOI: 10.3390/app11188484.
11. Капица П. Л. Турбодетандерные установки для получения низких температур. М.: Наука, 1965. 220 с. [Kapitsa P. L. Turbodetander installations for obtaining low temperatures. Moscow: Nauka, 1965. 220 p. (in Russian)]
12. Баранов И. А. Криогенные системы: Теория и расчет. СПб.: Химиздат, 2008. 384 с. [Baranov I. A. Cryogenic systems: Theory and calculation. St. Petersburg: Khimizdat, 2008. 384 p. (in Russian)]
13. Fang X. et al. Techno-economic optimization of cryogenic energy storage systems using advanced thermodynamic analysis. *Energy*. 2023. vol. 270. p. 126752. DOI: 10.1016/j. energy. 2023.126752.
14. Abdolalipouradl M. et al. Cost modeling and sensitivity analysis of heat exchangers in cryogenic applications. *Energy Conversion and Management*. 2019. vol. 190. p. 246–258. DOI: 10.1016/j. enconman. 2019.05.027.

Сведения об авторах

Благин Евгений Валерьевич

К. т. н., доцент кафедры теплотехники и тепловых двигателей Самарского национального исследовательского университета им. академика С. П. Королева, 443086, Россия, г. Самара, Московское шоссе, 34, evgenyblagin@gmail.com

Угланов Дмитрий Александрович

Д. т. н., доцент, профессор кафедры теплотехники и тепловых двигателей Самарского национального исследовательского университета имени академика С. П. Королева, 443086, г. Самара, Московское шоссе, 34, dmitry.uglanov@mail.ru

Битерякова Екатерина Михайловна

Лаборант-исследователь, Научно-образовательный центр ГДИ-209, Самарский национальный исследовательский университет имени академика С. П. Королева, 443086, Россия, г. Самара, Московское шоссе, 34. katya.biteryakova@mail.ru

Казандаев Василий Владимирович

Лаборант-исследователь, Научно-образовательный центр ГДИ-209, Самарский национальный исследовательский университет имени академика С. П. Королева, 443086, Россия, г. Самара, Московское шоссе, 34. kazandaev.vasya@mail.ru

Павлихин Иван Сергеевич

Лаборант-исследователь, Научно-образовательный центр ГДИ-209, Самарский национальный исследовательский университет имени академика С. П. Королева, 443086, Россия, г. Самара, Московское шоссе, 34. ivan.pavlikhin163@gmail.com

Information about authors

Blagin Evgeny V.

Ph. D., Associate Professor of Department of Heat Engineering and Heat Engines, Samara National Research University named after Academician S. P. Korolev, 443086, Russia, Samara, Moscow highway, 34, evgenyblagin@gmail.com

Uglanov Dmitriy A.

D. Sc., Associate Professor, Professor of the Department Thermal Engineering and Thermal Engines, Samara National Research University named after Academician S. P. Koroleva, 443086, Russia, Samara, Moskovskoe shosse, 34, dmitry.uglanov@mail.ru

Biteryakova Ekaterina M.

Research Assistant, Research and Education Center GDI-209, Samara National Research University named after Academician S. P. Korolev, 34, Moskovskoye shosse, Samara, 443086, Russia. katya.biteryakova@mail.ru

Kazandaev Vasily V.

Research Assistant, Research and Education Center GDI-209, Samara National Research University named after Academician S. P. Korolev, 34, Moskovskoye shosse, Samara, 443086, Russia. kazandaev.vasya@mail.ru

Pavlikhin Ivan S.

Research Assistant, Research and Education Center GDI-209, Samara National Research University named after Academician S. P. Korolev, 34, Moskovskoye shosse, Samara, 443086, Russia. ivan.pavlikhin163@gmail.com



Статья доступна по лицензии
Creative Commons «Attribution-NonCommercial»