

УДК 62–97

Эксергетический метод оценки эффективности низкотемпературных энергетических установок, использующих низкопотенциальное тепло криопродукта

Канд. техн. наук **О. В. ТРЕМКИНА**¹, д-р техн. наук **Д. А. УГЛАНОВ**^{1*},
д-р техн. наук **В. В. КАРНАУХ**^{2,3}

¹Самарский национальный исследовательский университет имени академика С. П. Королева»
(Самарский университет)

²Донецкий национальный университет экономики и торговли имени Михаила Туган-Барановского»

³Самарский государственный технический университет

*E-mail: dmitry.uglanov@mail.ru

Генерация электроэнергии — это самая распространенная область использования низкопотенциальной энергии сжиженного природного газа. Соответствующие технологии и схемные решения изучаются и совершенствуются. В работе представлен термодинамический анализ с элементами эксергетического метода одноконтурной низкотемпературной энергетической установки для выработки электроэнергии, использующей низкопотенциальную теплоту криопродукта. Выполненный анализ позволил определить эксергетическую эффективность, потоки эксергии, потери в каждом элементе, и другие параметры, характеризующие работу установки. Результаты показали, что эксергетическая эффективность η_e при начальной температуре криопродукта $T=111,6$ К составит 0,7. Предложенная методика и результаты термодинамического анализа одноконтурной низкотемпературной энергетической установки целесообразно использовать при решении проблемы оптимизации и прогнозирования работы одноконтурных и многоконтурных НЭУ для получения дополнительной электроэнергии.

Ключевые слова: эксергия, рабочее тело, сжиженный природный газ, криопродукт, низкопотенциальная теплота.

Информация о статье:

Поступила в редакцию 08.04.2024, одобрена после рецензирования 20.06.2024, принята к печати 28.06.2024

DOI: 10.17586/1606-4313-2024-23-3-18-24

Язык статьи — русский

Для цитирования:

Тремкина О. В., Угланов Д. А., Карнаух В. В. Эксергетический метод оценки эффективности низкотемпературных энергетических установок, использующих низкопотенциальное тепло криопродукта. // Вестник Международной академии холода. 2024. № 3. С. 18–24. DOI: 10.17586/1606-4313-2024-23-3-18-24

An exergetic method for evaluating the efficiency of low-temperature power plants using low-potential cryoproduct heat

Ph. D. **O. V. TREMKINA**¹, D. Sc. **D. A. UGLANOV**^{1*}, D. Sc. **V. V. KARNAUKH**^{2,3}

¹Samara National Research University

²Donetsk National University of Economics and Trade named after Mikhail Tugan-Baranovsky, Donetsk

³Samara State Technical University

*E-mail: dmitry.uglanov@mail.ru

The generation of electricity is the most common area of use for low-potential energy of liquefied natural gas. Relevant technologies and circuit solutions are studied and improved. Our paper presents the exergetic method as a part of thermodynamic analysis of a single-circuit low-temperature power plant for generating electricity using the low-potential heat of a cryoproduct. The analysis allowed the determination of the exergetic efficiency, the exergy flow destroyed in each component, and other variables characterizing operation of the plant. The results demonstrated that exergetic efficiency η_e of low-temperature power plant at $T_{in}=111,6$ K is 0.7. The proposed methodology and the results of thermodynamic analysis of a low-temperature power plant using low-potential heat of cryoproduct are recommended to use for solving the problems of optimizing and predicting the operation of single-circuit and multi-circuit power plants for power generation.

Keywords: exergy, working fluid, liquefied natural gas, cryoproduct, low-potential heat.

Article info:

Received 08/04/2024, approved after reviewing 20/06/2024, accepted 28/06/2024

DOI: 10.17586/1606-4313-2024-23-3-18-24

Article in Russian

For citation:

Tremkina O. V., Uglanov D. A., Karnaukh V. V. An exergetic method for evaluating the efficiency of low-temperature power plants using low-potential cryoproduct heat. *Journal of International Academy of Refrigeration*. 2024. No 3. p.18-24. DOI: 10.17586/1606-4313-2024-23-3-18-24

Введение

Природный газ (ПГ) является одним из самых экологически безопасных видов ископаемого топлива, который используется в современных энергетических системах и комплексах, обладает высокой эффективностью сгорания, высокой плотностью и содержится в малых количествах в выбросах парниковых газов [1].

Во всем мире потребление сжиженного природного газа (СПГ) составляет около 795 млн тонн в год, что эквивалентно 6,6 ГДж (20,9 ГВт) низкопотенциальной энергии (НЭ) криопродукта [2]. Ожидается, что мировое потребление СПГ в ближайшие пять лет может достичь 423 млрд тонн в год.

Существует несколько способов утилизации НЭ СПГ, которые позволяют использовать его более эффективно: в системах регазификации, в качестве топлива для транспорта, для разделения воздуха, в тепловых насосах, в когенерационных энергетических установках, в энергетических установках, работающих по комбинированному циклу с использованием теплоты СПГ, и др. [3, 4]. Эти способы способствуют более рациональному и устойчивому использованию НЭ, минимизируя потери и сокращая воздействие на окружающую среду. Самая распространенная область использования НЭ СПГ является его применение в когенерационных энергетических установках.

Однако НЭ СПГ на сегодняшний день лишь частично используется. К примеру, в теплообменниках-испарителях НЭ теряется за счет теплопритоков из окружающей среды. Использование НЭ СПГ в полном объеме и наибольшей эффективностью позволит существенно повысить качество процесса транспортировки, хранения, регазификации СПГ, а также снизить выбросы парниковых газов.

В последние годы вопросу использования НЭ СПГ посвящено большое количество публикаций и исследований. Авторами данной статьи, также ранее опубликованы материалы об использовании НЭ СПГ и оценке показателей эффективности НЭУ [5]–[9].

При сравнении энергетических систем, работающих при разных температурах и использующих различные источники энергии (например, электричество, топливо, тепло или энергию при низких температурах), эксергия является функцией состояния рабочего тела, которую лучше всего использовать при сравнении. Эксергия определяет качество или «истинную термодинамическую ценность» энергии, а эксергетический анализ определяет запас работоспособности системы.

Современные исследования в области эксергетического анализа технических систем, работающих при температурах, превышающих температуру окружающей

среды, демонстрируют значительный прогресс и подтверждены множеством эмпирических данных [1]–[12]. Экспериментальные результаты, полученные с использованием данного метода, характеризуются высокой степенью понятности и логичности. В то же время, применение эксергетического подхода к анализу процессов, осуществляемых при более низких температурах по отношению к температуре окружающей среды, также нашло отражение в академической литературе, преимущественно в контексте изучения процессов, связанных с умеренным охлаждением [1]–[12].

Вопрос применимости эксергетического анализа, как метода оценки эффективности низкотемпературных энергетических установок, использующих в качестве рабочего тела криопродукт, в научной литературе рассмотрен недостаточно широко.

Целью данной работы является исследование теоретической эффективности низкотемпературной энергетической установки с термодинамической точки зрения с использованием концепции эксергии с целью определения путей и пределов совершенствования их схемных решений.

Для достижения поставленной цели в данной работе выполнено теоретико-экспериментальное исследование НЭУ, использующей СПГ в качестве рабочего тела, на базе адаптированного эксергетического анализа, который не заменяет, а дополняет энергетический (энтропийный метод). Он характеризует запас работоспособности всей системы и указывает, какие компоненты данной НЭУ вызывают снижение ее эффективности и производительности. Такое понимание необходимо для дальнейшего рационального решения при проектировании низкотемпературных энергетических установок.

На рис. 1 представлена исследуемая одноконтурная НЭУ, которая в соответствии с предложенной в библиотеке НЭУ [11] классификацией обозначена следующим образом: I — 1R (111,6÷668 K) — СПГ. Схема одноконтурной НЭУ по типу распределения подводимой тепловой энергии между контурами является последовательной, верхний источник теплоты — выхлопные газы газотурбинной установки (ГТУ). Подача СПГ осуществляется в камеру сгорания ГТУ, одновременно с этим СПГ используется как источник НЭ [11].

Открытый цикл Ренкина является особенным, поскольку в нём используется только НЭ СПГ. Уникальность открытого цикла Ренкина состоит в его простоте. Цикл Ренкина является основой работы многих современных когенерационных и тригенерационных энергетических установок и играет ключевую роль в преобразовании низкопотенциальной энергии СПГ в механическую и далее в электрическую энергию.

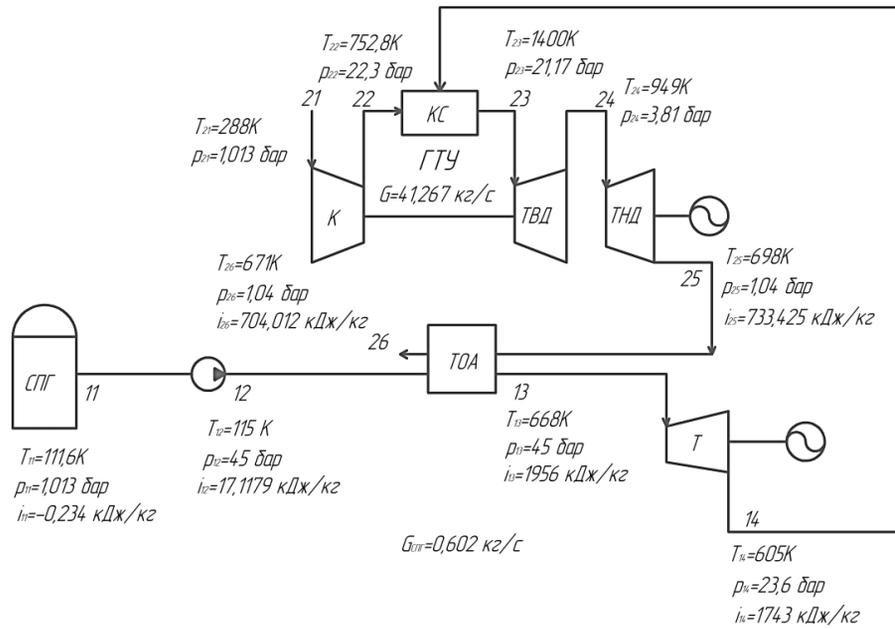


Рис. 1. Одноконтурная низкотемпературная энергетическая установка:

T — турбина; *TOA* — теплообменный аппарат; *ТНД* — турбина низкого давления; *ТВД* — турбина высокого давления; *КС* — камера сгорания; *К* — компрессор

Fig. 1. Single-circuit low-temperature power plant: *T* — turbine; *TOA* — heat exchanger; *LDP* — low-pressure turbine; *TVD* — high pressure turbine; *CW* — combustion chamber; *K* — compressor

В работе [1] авторы отмечают, что СПГ, как «зеленое» топливо, обладает большой физической эксергией, помимо высококачественной химической эксергии. Физическая эксергия состоит из эксергии холода и эксергии давления. Базисом для расчётов стала предложенная ими методика эксергетического расчета, которая была адаптирована для рассматриваемых НЭУ.

Для термодинамического процесса, сопровождающимся фазовым переходом СПГ при повышении температуры из первоначального состояния (T_s, p_s) до равновесного состояния (T_0, p_0) с окружающей средой, максимальная полезная работа процесса является физической эксергией СПГ и записывается в виде уравнения (1).

$$e_{\text{СПГ}} = - \int_{T_s}^{T_0} c_p dT + T_0 \int_{T_s}^{T_0} c_p \frac{dT}{T} - T_0 \int_{p_s}^{p_0} \left(\frac{\partial v}{\partial T} \right)_p dp, \quad (1)$$

где первые два интеграла — функции температуры, а последний интеграл — функция давления; T_s — абсолютная температура СПГ, К; p_s — давление в системе, кПа; T_0 — абсолютная температура окружающей среды, К; p_0 — давление окружающей среды, кПа.

Из уравнения (1) видно, что физическая эксергия СПГ состоит из двух частей: удельной эксергии холода $e_{\text{хол}}$, вызванной разностью температур между системой и окружающей средой (другими словами «тепловая энергия»), и удельной эксергии давления e_p , вызванной разностью давлений между системой и окружающей средой (другими словами «механическая энергия»).

$$e_{\text{физ.СПГ}} = e_{\text{хол}} + e_p = e_{\text{хол.явл}} + e_{\text{хол.скр.}} + e_p. \quad (2)$$

Формула (2) преобразована к виду уравнения (3):

$$e_{\text{физ. СПГ}} = \left[\left(\frac{T_0}{T_s} - 1 \right) r - c_p (T_0 - T_s) + c_p T_0 \ln \frac{T_0}{T_s} \right] + zRT_0 \ln \frac{p_s}{p_0}. \quad (3)$$

Уравнение (3) выражает полезную энергию СПГ, объединяющую энергию рабочего вещества при температуре более низкой, чем температура окружающей среды, и давления более высоком, чем атмосферное давление.

Основными факторами, влияющими на характеристики эксергии холода и эксергии давления СПГ, являются температура окружающей среды T_0 и давление в системе p_s .

Величина удельной эксергии в узловых точках цикла определяется в соответствии с формулой (4).

$$e_i = (h_i - h_0) - T_0 (s_i - s_0), \quad (4)$$

где h_i, s_i — параметры рабочего тела в i -й точке цикла; h_0, s_0 — параметры СПГ при T_0, p_0 .

Важнейшим показателем энергоэффективности НЭУ является эксергетический КПД, который характеризует степень необратимости реальных процессов, протекающих в ней (5).

$$\eta_e = \frac{\sum e_{\text{ввых}}}{\sum e_{\text{вх}}} = \frac{\sum e_{\text{вх}} - \sum d_i}{\sum e_{\text{вх}}} = 1 - \frac{\sum d_i}{e_{\text{СПГ}}}, \quad (5)$$

где $\sum e_{\text{вх}}$ и $\sum e_{\text{ввых}}$ — суммы входящих и выходящих потоков эксергии, соответственно, кДж/кг; $\sum d$ — сумма потерь эксергии, кДж/кг.

Методика и результаты расчетного исследования

Алгоритм эксергетического метода оценки эффективности одноконтурной НЭУ основан на фундаментальных работах известных ученых [12]–[17] и авторских наработках [18]. Авторами выполнен расчет и анализ каждого узла НЭУ (рис. 1) с учетом термодинамических

Таблица 1

Условия проведения исследований, параметры и функции состояния рабочих тел в узловых точках

Table 1

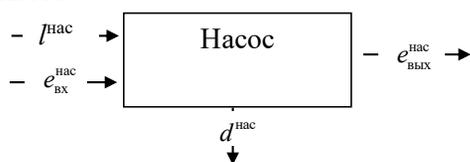
Experimental conditions, parameters and functions of liquefied natural gas at the nodal points

Параметр/узел	T, K	p, MPa	$h, кДж/кг$	$s, кДж/(кгK)$	$e, кДж/кг$
Окружающая среда	293	0,1	419,26	3,87	—
Параметры СПГ при T_0, p_0	293	0,1	898,5	6,643	—
11	111,6	0,1	-0,234	-0,0021	1048,2803
12	115	4,5	17,12	0,06637	1045,57259
13	668	4,5	1956	6,919	976,632
14	605	2,36	1743	6,921	763,046
25	698	0,104	733,425	7,727	164,067
26	671	0,104	704,012	7,683	147,546

особенностей рабочего тела. Условия проведения исследований показаны в табл. 1.

Анализ каждого узла контура включает определение потоков эксергии на входе и выходе, работы (если есть), потерь эксергии и эксергетического КПД.

1. Насос.



На входе в насос СПГ обладает эксергией $e_{СПГ} = e_{вх}^{нас}$. Кроме того, для работы насоса извне подводится энергия в виде работы: $l^{нас} = h_{12} - h_{11}$, кДж/кг.

Величина эксергии на выходе из насоса: $e_{вых}^{нас} = (h_{12} - h_0) - T_0(s_{12} - s_0)$, кДж/кг.

Потери эксергии в насосе: $d^{нас} = e_{вх}^{нас} + l^{нас} - e_{вых}^{нас}$, кДж/кг. Эксергетический КПД насоса:

$$\eta_e^{нас} = 1 - \frac{d^{нас}}{(e_{вх}^{нас} + l^{нас})}$$

2. Теплообменный аппарат (ТОА).



На выходе из насоса рабочее тело обладает эксергией, которая равна эксергии рабочего тела на входе в теплообменник (ТОА): $e_{вых}^{нас} = e_{вх}^{тоа}$.

На выходе из ТОА: $e_{вых}^{тоа} = (h_{13} - h_0) - T_0(s_{13} - s_0)$.

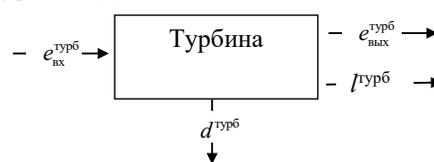
Потери эксергии в ТОА представляют собой сумму четырех потерь:

- за счет конечной разности температур;
- гидравлических сопротивлений;
- необратимым теплообменом с окружающей средой;
- потери, вызванные теплопроводностью вдоль теплообменника.

В общем виде потери определяются: $d^{тоа} = e_{вх}^{тоа} - e_{вых}^{тоа}$, кДж/кг.

Эксергетический КПД ТОА: $\eta_e^{тоа} = 1 - \frac{d^{тоа}}{e_{вх}^{тоа}}$.

3. Турбина (Т).



На входе в турбину $e_{вых}^{тоа} = e_{вх}^{турб}$.

В турбине совершается полезная работа, которая определяется с учетом электрического КПД турбины: $l^{турб} = (h_{14} - h_{13}) \cdot \eta_{эл}$, где $\eta_{эл} = 0,35 \dots 0,4$.

Отработанное рабочее тело покидает турбину с эксергией $e_{вых}^{турб} = (h_{14} - h_0) - T_0(s_{14} - s_0)$.

Потери эксергии в турбине: $d^{турб} = e_{вх}^{турб} - e_{вых}^{турб} - l^{турб}$, кДж/кг.

Потери эксергии в турбине обусловлены тремя факторами:

- за счет механических потерь в турбине;
- за счет механических и электрических потерь в электрогенераторе;
- за счет необратимости расширения рабочего тела в турбине.

Эксергетический КПД турбины: $\eta_e^{турб} = 1 - \frac{d^{турб}}{e_{вх}^{турб}} = \frac{e_{вх}^{ввых}}{e_{вх}^{турб}}$.

Как следует из рис. 1, эксергия СПГ на выходе из турбины является эксергией топлива на входе в камеру сгорания КС контура ГТУ: $e_{вх}^{турб} = e_{вх}^{топл}$.

Эксергетический КПД установки определяется по формуле (5).

Если принять за 100 % эксергию СПГ в криогенной емкости хранения, то потери эксергии в отдельных элементах установки определяются по формуле (6).

$$d_{\%i} = \frac{d_i \cdot 100}{e_{СПГ}} \tag{6}$$

В данной работе при комплексной оценке также были учтены индекс эксергетической устойчивости (ИЭУ) (7) и экологический коэффициент преобразования (ЕСОР) (8) [10].

$$ИЭУ = \frac{1}{\eta_e} - 1 \tag{7}$$

$$ЕСОР = \frac{l^{турб}}{\sum d_i} \tag{8}$$

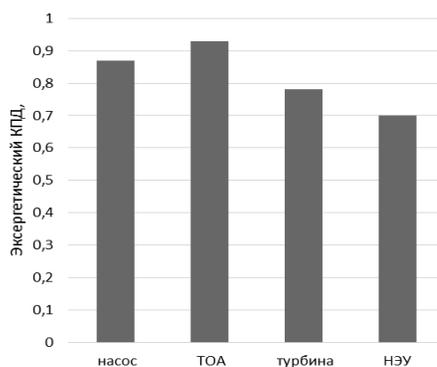


Рис. 2. Значения эксергетического КПД каждого компонента низкотемпературной энергетической установки

Fig. 2. Exergetic performance coefficient for every component of low-temperature power plant

Для оценки работы, использовано программное обеспечение: REFPROP ver. 9.0, MS Excel.

Значения параметров, характеризующих энергоэффективность НЭУ следующие: эксергетический КПД насоса $\eta_e^{\text{нас}} = 0,87$; эксергетический КПД $\eta_e^{\text{ТОА}} = 0,93$; эксергетический КПД турбины $\eta_e^{\text{турб}} = 0,78$; эксергетический КПД всей установки $\eta_e = 0,7$ (рис. 2); индекс эксергетической устойчивости ИЭУ = 0,43 и экологический коэффициент преобразования EСOP = 0,24.

Большая разность температур между источником тепла и источником холода в цикле напрямую приводит к повышению выхода эксергии, и, следовательно, повышению эксергетического КПД и эффективности цикла.

На рис. 3 представлена диаграмма долевого распределения потерь эксергии в элементах одноконтурной низкотемпературной энергетической установки. Полученные результаты по отдельным элементам установки показали, что наибольшие потери эксергии приходятся на насос, при этом доля потерь в ТОА в 1,87 раза меньше, чем в турбине. Последние вызваны необратимым характером теплообмена.

Важной особенностью результатов эксергетического анализа НЭУ является то, что он представляет возможность большей, по сравнению с энтропийным методом, детализации потерь энергии в установке и её основных элементах. Можно получить не только объективную количественную оценку интегрального показателя каче-

Литература

1. Qiang Wang, Li Yanzhong, Chen Xi. Exergy analysis of liquefied natural gas cold energy recovering cycles. // *International Journal of Energy Research*. 2005. no 29.
2. IGU I. G. U. World LNG report // International Gas Union (IGU), Barcelona. 2017.
3. Uglanov D. A. LNG power complex integrated with air separation unit and low-temperature power plant / D. A. Uglanov, O. A. Manakova, O. V. Tremkina, D. V. Sarmin // *Proceedings — 2021. 3rd International Conference on Electrical Engineering and Control Technologies, CEECT 2021*. 2021. Pp. 187–190.
4. Pan J. Energy, exergy and economic analysis of different integrated systems for power generation using LNG cold energy



Рис. 3. Диаграмма потерь эксергии в элементах одноконтурной низкотемпературной энергетической установки

Fig. 3. Energy losses in the elements of low-temperature power plant using low-potential heat of cryoproduct

ства их работы (эксергетический КПД), но и выявить места и причины наибольших эксергетических потерь, что позволит разработать и создать методы повышения их эффективности.

Заключение

В проведенной работе было определено, что эксергетический КПД низкотемпературной энергетической установки, использующей низкпотенциальное тепло криопродукта с начальной температурой $T = 111,6$ К, составит $\eta_e = 0,7$. Неожиданно высокие значения эксергетического КПД у ТОА, что подталкивает к проведению отдельного эксергетического расчета ТОА с учетом термодинамических свойств контактирующих сред.

Предложенная методика и результаты термодинамического анализа одноконтурной низкотемпературной энергетической установки целесообразно использовать при решении проблемы оптимизации и прогнозирования работы одноконтурных и многоконтурных НЭУ для выработки электроэнергии. Дальнейшей задачей исследования является развитие методики оптимального проектирования многоконтурных НЭУ с учетом потерь эксергии термодинамических систем.

Благодарности

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

References

1. Qiang Wang, Li Yanzhong, Chen Xi. Exergy analysis of liquefied natural gas cold energy recovering cycles. *International Journal of Energy Research*. 2005. no 29.
2. IGU I. G. U. World LNG report. *International Gas Union (IGU)*, Barcelona. 2017.
3. Uglanov D. A. LNG power complex integrated with air separation unit and low-temperature power plant / D. A. Uglanov, O. A. Manakova, O. V. Tremkina, D. V. Sarmin. *Proceedings — 2021. 3rd International Conference on Electrical Engineering and Control Technologies, CEECT 2021*. 2021. Pp. 187–190. (in Russian)
4. Pan J. Energy, exergy and economic analysis of different integrated systems for power generation using LNG cold energy

- and geothermal energy / J. Pan, M. Li, M. Zhu, R. Li, L. Tang, J. Bai // *Renewable Energy*. 2022. no 202. Pp. 1054–1070.
5. Архаров И. А. Оценка показателей эффективности схемных решений установок когенерации на базе ГТУ при использовании СПГ в качестве топлива / И. А. Архаров, А. И. Довгялло, Д. А. Угланов, О. В. Тремкина // *Химическое и нефтегазовое машиностроение*. 2023. № 1. С. 25–30.
 6. Тремкина О. В. Энергетический комплекс на СПГ, интегрированный с воздуходелительной установкой и низкотемпературными энергоустановками / О. В. Тремкина, Д. А. Угланов, О. А. Манакова, А. Б. Шиманова // *Вестник Международной академии холода*. 2022. № 3. С. 3–12.
 7. Tereshchenko O. V. Comparative Analysis of Power Plants Using Low Potential Heat of Liquefied Natural Gas (LNG) / O. V. Tereshchenko, D. A. Uglanov, E. V. Blagin, R. A. Panshin, V. V. Biryuk // *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. 2019. Vol. 692. Issue 1.
 8. Tremkina O. V. Calculation of energy parameters of LNG power plant with utilization its cold energy / O. V. Tremkina, D. A. Uglanov, D. V. Sarmin, O. A. Manakova, A. L. Lopatin // *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. 2020. Vol. 926. Issue 1.
 9. Tremkina O. V. Comprehensive Solution to Improve the Efficiency of the LNG Energy Complex Through the Use Cold Energy of Cryoproducts / O. V. Tremkina, O. A. Manakova, R. A. Panshin // *Proceedings — 2021 7th International Conference on Mechanical Engineering and Automation, ICMEAS 2021*. 2021. Pp. 155–159.
 10. Благин Е. В. Низкотемпературные энергетические установки, использующие низкпотенциальную энергию СПГ (Обзор публикаций по низкотемпературным энергетическим установкам с целью выявления схемных решений, состава и определения характеристик) / Е. В. Благин, О. А. Манакова, О. В. Тремкина, Д. А. Угланов; Самарский национальный исследовательский университет имени академика С. П. Королева. Самара, 2023. 485 с. Деп. в ВИНТИ 10.04.2023. № 10-B2023.
 11. Тремкина О. В. Совершенствование метода определения характеристик низкотемпературных энергоустановок летательных аппаратов // дисс. канд. техн. наук: защищена 8.12.2023 / Тремкина Ольга Витальевна; Самарский национальный исследовательский университет имени академика С. П. Королева. Самара. 2023. 178 с.
 12. Тремкина О. В. Эксергетический метод оценки эффективности низкотемпературных энергетических установок, использующих низкпотенциальное тепло криопродукта / О. В. Тремкина, Д. А. Угланов, В. В. Карнаух // *Международная научно-техническая конференция «Искусственный холод в XXI веке»*. 2024. Ч. 2. С. 139–144.
 13. Бродянский В. М. Эксергетический метод и его приложения / В. М. Бродянский, В. Фратшер, К. Михалек. 1988. 286 с.
 14. Dyskin L. M., Grimalovskaya I. P. Эксергетические характеристики сжатого воздуха. // *Приволжский научный журнал*. 2019. № 1 (49). С. 58–63.
 15. Hassan A. Comparative exergetic analyses of gas turbine steam injection cycles with and without fogging inlet cooling / A. Hassan, S. Saeed, A. Marc, Rosen Seyed Mohammad Seyed Mahmoudi, T. Morosuk. // *Sustainability*. 2015. no 7. Pp. 12236–12257.
 16. Hamdy S. Exergetic and economic assessment of integrated cryogenic energy storage systems / S. Hamdy, T. Morosuk, G. Tsatsaronis // *Cryogenics*. 2019. Vol. Pp. 39–50.
 - and geothermal energy / J. Pan, M. Li, M. Zhu, R. Li, L. Tang, J. Bai. *Renewable Energy*. 2022. no 202. Pp. 1054–1070.
 5. Arkharov I. A. Assessing the efficiency indicators of circuit solutions for cogeneration plants based on gas turbine units when using LNG as a fuel / I. A. Arkharov, A. I. Dovgiallo, D. A. Uglanov, O. V. Tremkina. *Chemical and oil and gas engineering*. 2023. No. 1. Pp. 25–30. (in Russian)
 6. Tremkina O. V. Energy complex using LNG, integrated with an air separation plant and low-temperature power plants / O. V. Tremkina, D. A. Uglanov, O. A. Manakova, A. B. Shimanova. *J. of the International Academy of Refrigeration*. 2022. No. 3. Pp. 3–12. (in Russian)
 7. Tereshchenko O. V. Comparative Analysis of Power Plants Using Low Potential Heat of Liquefied Natural Gas (LNG) / O. V. Tereshchenko, D. A. Uglanov, E. V. Blagin, R. A. Panshin, V. V. Biryuk. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. 2019. Vol. 692. Issue 1.
 8. Tremkina O. V. Calculation of energy parameters of LNG power plant with utilization its cold energy / O. V. Tremkina, D. A. Uglanov, D. V. Sarmin, O. A. Manakova, A. L. Lopatin. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. 2020. Vol. 926. Issue 1.
 9. Tremkina O. V. Comprehensive Solution to Improve the Efficiency of the LNG Energy Complex Through the Use Cold Energy of Cryoproducts / O. V. Tremkina, O. A. Manakova, R. A. Panshin. *Proceedings — 2021 7th International Conference on Mechanical Engineering and Automation, ICMEAS 2021*. 2021. Pp. 155–159.
 10. Blagin E. V. Low-temperature power plants using low-potential LNG energy (Review of publications on low-temperature power plants to identify circuit designs, composition and characteristics) / E. V. Blagin, O. A. Manakova, O. V. Tremkina, D. A. Uglanov; Samara National Research University named after Academician S. P. Queen. Samara, 2023. 485 p. Dep. at VINITI 04/10/2023. No. 10-B2023. (in Russian)
 11. Tremkina O. V. Improving the method for determining the characteristics of low-temperature power plants of aircraft // diss. Ph. D. tech. Sciences: protected 12/8/2023 / Tremkina Olga Vitalievna; Samara National Research University named after Academician S. P. Queen. Samara. 2023. 178 p. (in Russian)
 12. Tremkina O. V. Exergetic method for assessing the efficiency of low-temperature power plants using low-potential heat of a cryogenic product / O. V. Tremkina, D. A. Uglanov, V. V. Karnaukh. *International scientific and technical conference «Artificial cold in the 21st century»*. 2024. Part 2. P. 139–144. (in Russian)
 13. Brodyansky V. M. Exergetic method and its applications / V. M. Brodyansky, V. Fratscher, K. Michalek. 1988. 286 p. (in Russian)
 14. Dyskin, L. M. Exergy characteristics of compressed air / L. M. Dyskin, I. P. Grimalovskaya. *Volga Scientific Journal*. 2019. No. 1 (49). Pp. 58–63. (in Russian)
 15. Hassan A. Comparative exergetic analyses of gas turbine steam injection cycles with and without fogging inlet cooling / A. Hassan, S. Saeed, A. Marc, Rosen Seyed Mohammad Seyed Mahmoudi, T. Morosuk. *Sustainability*. 2015. no 7. Pp. 12236–12257.
 16. Hamdy S. Exergetic and economic assessment of integrated cryogenic energy storage systems / S. Hamdy, T. Morosuk, G. Tsatsaronis. *Cryogenics*. 2019. Vol. Pp. 39–50.

17. Karakurt S. Exergetic and economic analysis of subcooling and superheating effect on vapor compression refrigeration system / S. Karakurt, U. Gunes, Y. Ust // Proceedings of the ASME 2016. Power Conference POWER 2016. Charlotte, North Carolina. 2016. Pp. 1–6.
18. Karnaukh V. V. Specifics of Calculation and Prediction of the Operation of Heat Pumps Working on Fourth Generation Refrigerants. // Journal of Siberian Federal University. Engineering and technologies. 2022. vol. 15. no 2. Pp. 202–215.
17. Karakurt S. Exergetic and economic analysis of subcooling and superheating effect on vapor compression refrigeration system / S. Karakurt, U. Gunes, Y. Ust. Proceedings of the ASME 2016. Power Conference POWER 2016. Charlotte, North Carolina. 2016. Pp. 1–6.
18. Karnaukh V. V. Specifics of Calculation and Prediction of the Operation of Heat Pumps Working on Fourth Generation Refrigerants. *Journal of Siberian Federal University. Engineering and technologies*. 2022. vol. 15. No 2. Pp. 202–215.

Сведения об авторах

Угланов Дмитрий Александрович

Д. т. н., профессор кафедры «Теплотехника и тепловые двигатели» Самарского национального исследовательского университета им. академика С. П. Королёва, 443086, Россия, г. Самара, Московское шоссе, 34, dmitry.uglanov@mail.ru.

Тремкина Ольга Витальевна

К. т. н., ассистент кафедры «Теплотехника и тепловые двигатели» Самарского национального исследовательского университета им. академика С. П. Королёва, 443086, Россия, г. Самара, Московское шоссе, 34, t.olga.vit@bk.ru.

Карнаух Виктория Викторовна

Д. т. н., профессор Донецкого национального университета экономики и торговли имени Михаила Туган-Барановского, ДНР, 83050, г. Донецк, ул. Щорса, 31; доцент Самарского государственного технического университета, 443100, Самара, ул. Молодогвардейская, 244, karnaukh.vita0629@gmail.com

Information about authors

Uglanov Dmitry A.

D. Sc., Professor of department heat engineering and heat engines, Samara National Research University named after academician S. P. Korolev, 34, Moskovskoye shosse, Samara, 443086, Russia, dmitry.uglanov@mail.ru.

Tremkina Olga V.

Ph. D., Assistant at the Department of Heat Engineering and Heat Engines, Samara National Research University. Academician S. P. Koroleva, 34, Moskovskoye shosse, Samara, 443086, Russia, t.olga.vit@bk.ru.

Karnaukh Victoria V.

D. Sc., Professor of the Donetsk National University of Economics and Trade named after Mikhail Tugan-Baranovsky, DNR, 83050, Donetsk, Shchors str., 31; Associate professor of Samara State Technical University, 244 Molodogvardeyskaya str., Samara, 443100, Russia, karnaukh.vita0629@gmail.com.



Статья доступна по лицензии
Creative Commons «Attribution-NonCommercial»

О Перечне рецензируемых научных изданий

В связи с вступлением в силу новой редакции номенклатуры научных специальностей, по которым присуждаются ученые степени, утвержденной приказом Минобрнауки России от 24 февраля 2021 г. № 118, издано распоряжение Минобрнауки России от 1 февраля 2022 г. № 33-р о Перечне рецензируемых научных изданий, в которых должны быть опубликованы основные научные результаты диссертаций на соискание ученой степени кандидата наук, на соискание ученой степени доктора наук.

Вестник Международной академии холода, включенный в Перечень рецензируемых научных изданий (по состоянию на 08.07.2024 г.) под № 545, принимает статьи по следующим научным направлениям:

- 1.3.2. Приборы и методы экспериментальной физики
- 1.3.8. Физика конденсированного состояния
- 1.3.10. Физика низких температур
- 1.3.14. Теплофизика и теоретическая теплотехника
- 2.4.6. Теоретическая и прикладная теплотехника
- 2.4.8. Машины и аппараты, процессы холодильной и криогенной техники
- 4.3.1. Технологии, машины и оборудование для агропромышленного комплекса
- 4.3.3. Пищевые системы
- 4.3.5. Биотехнология продуктов питания и биологически активных веществ

Подробная информация на сайте ВАК РФ в разделе "Документы" – "Рецензируемые издания"

https://vak.minobrnauki.gov.ru/documents#tab=_tab:editions~