

ОЦЕНКА ВЛИЯНИЯ РАЗЛИЧНЫХ ФАКТОРОВ НА ЭФФЕКТИВНОСТЬ РАБОТЫ НИЗКОТЕМПЕРАТУРНЫХ ЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ УСТАНОВОК

© 2024

- О. В. Тремкина** кандидат технических наук, доцент кафедры теплотехники и тепловых двигателей, младший научный сотрудник Научно-образовательного центра газодинамических исследований; Самарский национальный исследовательский университет имени академика С.П. Королёва; tereshchenko.ov@ssau.ru
- Е. В. Благин** кандидат технических наук, доцент кафедры теплотехники и тепловых двигателей, научный сотрудник Научно-образовательного центра газодинамических исследований; Самарский национальный исследовательский университет имени академика С.П. Королёва; blagin.ev@ssau.ru
- Р. А. Паньшин** младший научный сотрудник Научно-образовательного центра газодинамических исследований; Самарский национальный исследовательский университет имени академика С.П. Королёва; panshinroman2016@yandex.ru
- В. И. Шихалев** инженер-конструктор Научно-образовательного центра газодинамических исследований; Самарский национальный исследовательский университет имени академика С.П. Королёва; shikhalev.vi@ssau.ru

Актуальным направлением развития современных энергетических установок является применение в качестве топлива природного газа. В работе представлена методика оценки влияния различных факторов на эффективность работы низкотемпературных энергетических установок на примере влияния тепловых потоков теплообменных аппаратов, а также проведён сравнительный анализ параметров и характеристик теплообменников-испарителей в системах хранения сжиженного природного газа и в энергетических системах, использующих низкопотенциальную энергию криопродукта. Приведён анализ массива данных, полученных из различных статей, с описанием энергетических комплексов, в которых используется низкопотенциальное тепло криопродукта. Также описан метод оценки влияния системы регазификации криопродукта на общую эффективность энергетических установок и систем.

Низкотемпературная энергетическая установка; низкопотенциальная энергия; криопродукт; сжиженный природный газ; регазификация

Цитирование: Тремкина О.В., Благин Е.В., Паньшин Р.А., Шихалев В.И. Оценка влияния различных факторов на эффективность работы низкотемпературных энергетических установок // Вестник Самарского университета. Аэрокосмическая техника, технологии и машиностроение. 2024. Т. 23, № 4. С. 180-190. DOI: 10.18287/2541-7533-2024-23-4-180-190

Введение

В настоящее время природный газ (ПГ) становится одним из важнейших источников энергии, так как запасы его огромны, и он является экологически чистым топливом по сравнению с нефтепродуктами. ПГ в компактном для транспортировки и хранения виде может содержаться в сжатом (газообразном) и сжиженном состояниях. Наиболее актуальным на сегодняшний момент является использование сжиженного природного газа (СПГ) в качестве энергоносителя для тех же целей, что и обычного ПГ,

так как это позволяет уменьшать массогабаритные характеристики ёмкостей для хранения и перевозки.

Основные области применения СПГ – это производство тепла и электричества, использование в качестве топлива для машин и оборудования, в бытовых нуждах [1 – 3].

В сжиженном состоянии ПГ при давлении 101325 Па в 640 раз плотнее, чем в газообразном состоянии при том же давлении, что значительно уменьшает объём и массу ёмкостей для его хранения и перевозки, а также делает технически возможным накопление, хранение и выдачу потребителям больших масс газа в необходимый момент. Например, только в сжиженном состоянии ПГ позволяет экономически выгодно решить проблему его доставки на большие расстояния. СПГ даёт возможность газификации объектов, удалённых от магистральных трубопроводов на большие расстояния, путём создания резерва СПГ в хранилищах для дальнейшей транспортировки непосредственно потребителю, избегая строительства протяжённых, дорогостоящих трубопроводных систем.

Обычно газификация СПГ происходит за счёт теплоты, подведённой от окружающей среды. При этом считается, что использование теплоты окружающей среды является малозатратным процессом с энергетической точки зрения. Однако стоит учитывать, что при ожигении ПГ было затрачено значительное количество энергии (около 0,5...1 кВт·ч энергии на 1кг СПГ), которая при данном способе регазификации безвозвратно сбрасывается в окружающую среду. Таким образом, СПГ (как и любой другой криопродукт) содержит в себе энергетический потенциал, который можно было бы использовать при его возвращении в исходное газообразное состояние, и, следовательно, сам процесс регазификации СПГ обладает определённым потенциалом для энергосбережения.

Данный энергетический потенциал называют низкопотенциальной энергией (или низкопотенциальным теплом). Этот вид энергии применяют при регазификации в качестве холодной среды либо для охлаждения рабочего пара для «замыкания» цикла Ренкина (цикла паротурбинной установки), либо для охлаждения воздуха между ступенями компрессора для повышения эффективности сжатия в цикле Брайтона (цикле газотурбинной установки) [4; 5].

Подобное применение часто подразумевает усложнение общей схемы энергетической установки, а это, в свою очередь, ставит вопрос о влиянии подобных технических решений на общую эффективность преобразования энергии подведённой теплоты в циклах, поскольку у каждого процесса цикла есть собственная эффективность и, следовательно, энергетические потери [6].

Методика оценки эффективности и массогабаритных характеристик низкотемпературных энергетических установок

Оценка эффективности и массогабаритных характеристик низкотемпературных энергетических установок (НЭУ) проводилась на основе расчётного исследования основных параметров НЭУ путём получения значений КПД цикла Карно (данный КПД показывает максимальную теоретическую эффективность в заданном диапазоне температур), а также теплового КПД, эксергетического КПД, КПД Новикова – Карзона, расчётного КПД «карнотизированного» цикла, отношения теплового потока к разнице температур и удельного отношения теплового потока к разнице температур.

Отношение температур для каждого контура определялось по формуле:

$$\tau_i = \frac{T_{zi}}{T_{ki}}, \quad (1)$$

где T_{zi} – наибольшая температура рабочего тела i -го контура, К; T_{ki} – наименьшая температура рабочего тела i -го контура, К.

КПД Карно вычислялся по формуле:

$$\eta_{ci} = \frac{T_{zi} - T_{ki}}{T_{zi}} = 1 - \frac{1}{\tau_i}. \quad (2)$$

Тепловой КПД [7] определялся по формуле:

$$\eta_{ti} = 1 - \frac{Q_{2i}}{Q_{1i}}, \quad (3)$$

где Q_{1i} – подведённая тепловая мощность в i -й контур, кВт; Q_{2i} – тепловая мощность, отводимая от i -го контура, кВт.

Важнейшим показателем энергоэффективности НЭУ является эксергетический КПД, который характеризует степень необратимости реальных процессов, протекающих в НЭУ [8]:

$$\eta_{ex} = \frac{\sum e_{вых}}{\sum e_{ex}} = \frac{\sum e_{ex} - \sum d_i}{\sum e_{ex}} = 1 - \frac{\sum d_i}{\sum e_{спп}}, \quad (4)$$

где $\sum e_{ex}$ и $\sum e_{вых}$ – суммы входящих и выходящих потоков эксергии, соответственно, кДж/кг; $\sum d_i$ – сумма потерь эксергии, кДж/кг.

КПД Новикова – Карзона [9; 10] определялся по формуле:

$$\eta_{Ni} = 1 - \sqrt{\frac{T_{ki}}{T_{zi}}} = 1 - \sqrt{\frac{1}{\tau_i}}. \quad (5)$$

Расчётный КПД «карнотизированного» цикла НЭУ [11; 12], полученного при условии конечных температурных напоров между нижним и верхним температурными уровнями и получении максимальной работы, вычислялся по формуле:

$$\eta_{tNi} = 1 - (1 - \eta_{ci})^{0,38}. \quad (6)$$

Отношение теплового потока к разнице температур (показатель влияния теплообменных аппаратов на температуры рабочих тел [13]) вычислялось по формуле:

$$kF = \frac{Q}{dT}, \quad (7)$$

где Q – затраченная теплота на регазификацию криопродукта, кВт; dT – разница температур до и после процесса регазификации, К.

Удельное отношение теплового потока к разнице температур (показатель влияния теплообменных аппаратов на температуры рабочих тел на 1 кг криопродукта [13]) вычислялось по формуле:

$$kF_{y0} = \frac{kF}{G}, \quad (8)$$

где G – расход криопродукта, кг/с.

Обработка результатов расчётного исследования основных параметров низкотемпературных энергетических установок

Для практического применения предлагаемой методики оценки влияния различных факторов на эффективность работы НЭУ был исследован большой массив данных, включающий множество вариантов типовых схем НЭУ. Для последующей обработки результатов рассмотренные НЭУ классифицированы по следующим признакам: основной типовой цикл, на основе которого разработан энергетический комплекс; основное рабочее тело; количество рабочих контуров; источники подвода и отвода теплоты. Пример подобной классификации представлен в табл. 1. В рассмотренном массиве данных нижний температурный уровень – температура кипения СПГ, который поступает в систему с помощью криогенных насосов. По результатам расчётов были определены зависимости теплового КПД, эксергетического КПД, КПД Новикова – Карзона и расчётного КПД «карнотизированного» цикла НЭУ от отношения наибольшей и наименьшей температур, а также зависимости теплового КПД и эксергетического КПД от удельного отношения теплового потока к разнице температур. Результаты представлены в табл. 2 и на рис. 1 – 6.

Таблица 1. Исходные данные рассмотренных низкотемпературных энергетических установок

НЭУ	Основной цикл	Рабочее тело	Количество контуров	Подвод теплоты
Krey 1980 [14]	Брайтона	Азот	Одноконтурная	Горение
Weber 1980 [15]	Брайтона	Азот	Одноконтурная	Горение
Najjar 1993 [16]	Брайтона / Ренкина	Метан / Пропан / Воздух	Трёхконтурная	Горение
Bisio 1994 [17]	Брайтона	Азот	Одноконтурная	Вторичное тепло
Wong 1994 [18]	Ренкина	Метан / Пропан	Двухконтурная	Окружающая среда
Chiesa 1997 [19]	Брайтона	Азот	Одноконтурная	Горение

Таблица 2. Результаты расчётного исследования основных параметров низкотемпературных энергетических установок

НЭУ	η_c	η_t	η_{ex}	η_N	$kF_{y0}, \frac{\text{кДж}}{\text{кг} \cdot \text{К}}$
Krey 1980 [14]	0,89	0,62	0,74	0,67	102,86
Weber 1980 [15]	0,89	0,72	0,75	0,67	106,09
Najjar 1993 [16]	0,91	0,35	0,52	0,70	81,32
Bisio 1994 [17]	0,86	0,43	0,57	0,63	53,91
Wong 1994 [18]	0,63	0,24	0,33	0,39	77,56
Chiesa 1997 [19]	0,90	0,65	0,77	0,68	134,51

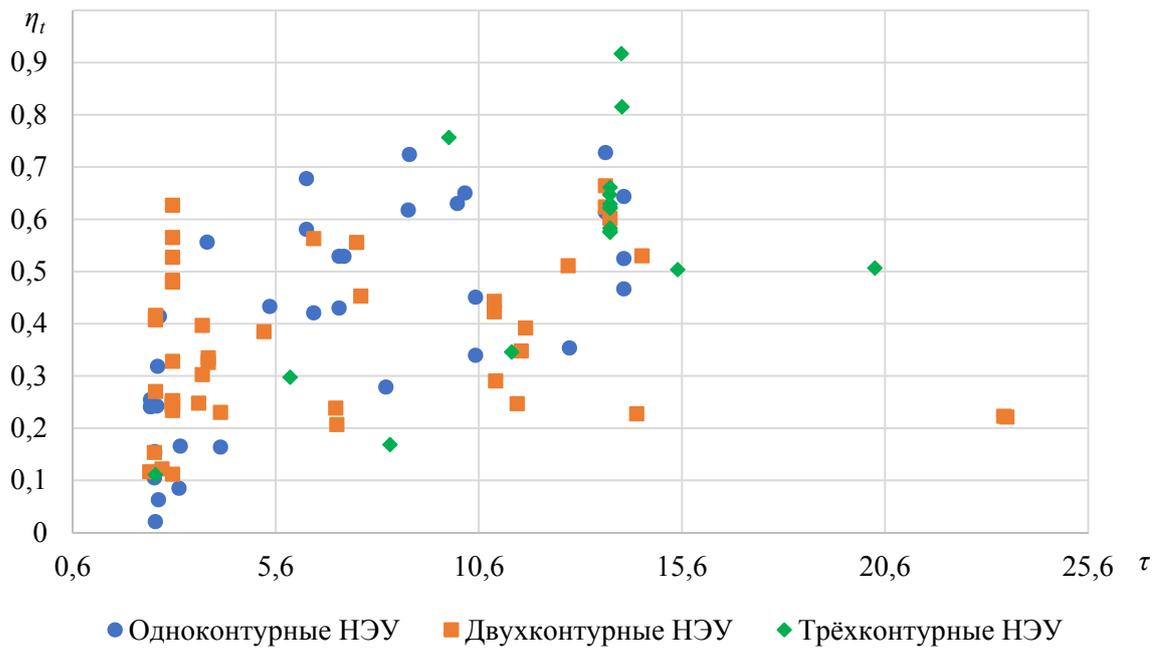


Рис. 1. Зависимость теплового КПД от отношения наибольшей и наименьшей температур цикла низкотемпературных энергетических установок

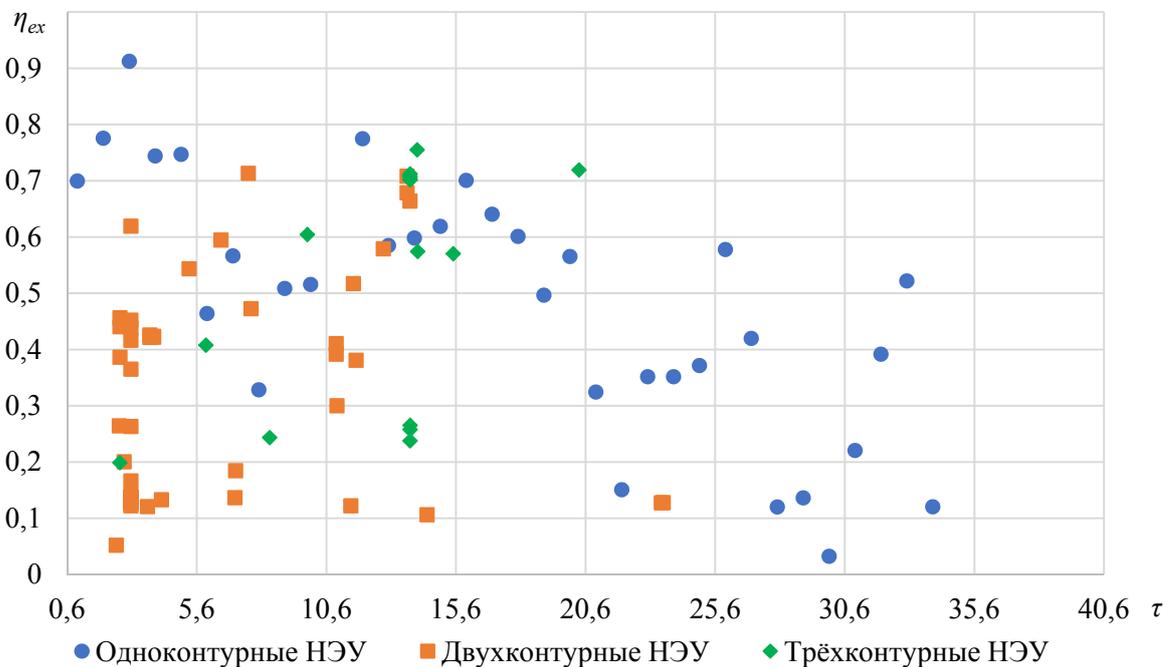


Рис. 2. Зависимость эксергетического КПД от отношения наибольшей и наименьшей температур цикла низкотемпературных энергетических установок

На рис. 1 – 3 представлены зависимости показателей эффективности НЭУ от отношения наибольшей и наименьшей температур цикла НЭУ. Можно заметить, что максимальная эффективность преобразования энергии в элементах НЭУ чаще наблюдаются в двух- и трёхконтурных НЭУ. Однако присутствуют и исключения среди одноконтурных НЭУ.

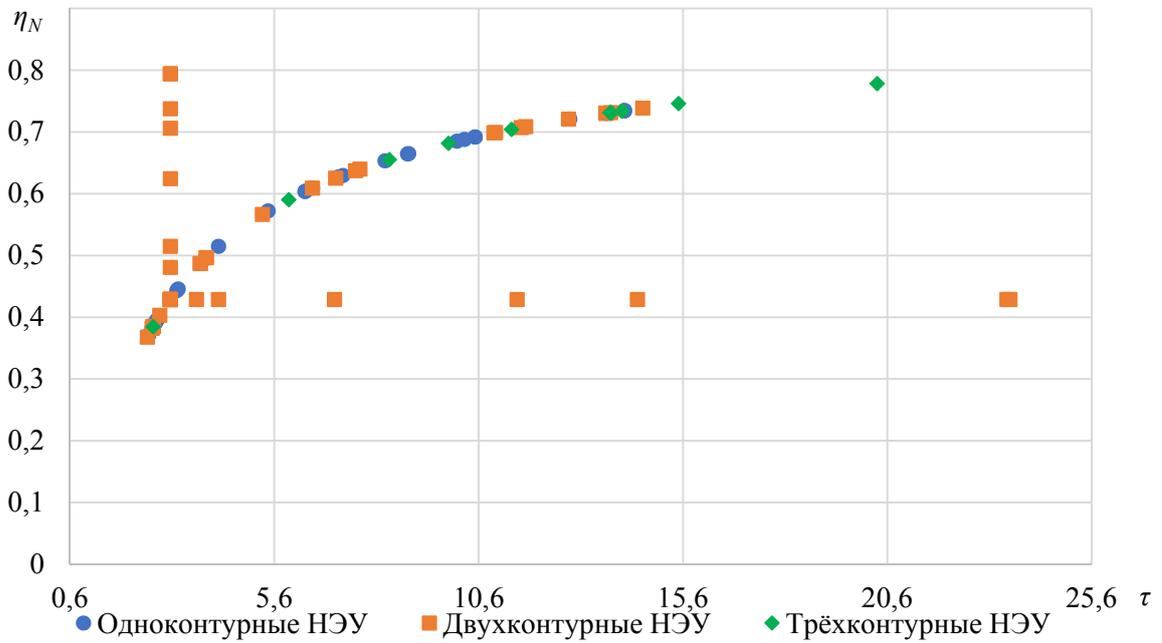


Рис. 3. Зависимость КПД Новикова – Карзона от отношения наибольшей и наименьшей температур цикла низкотемпературных энергетических установок

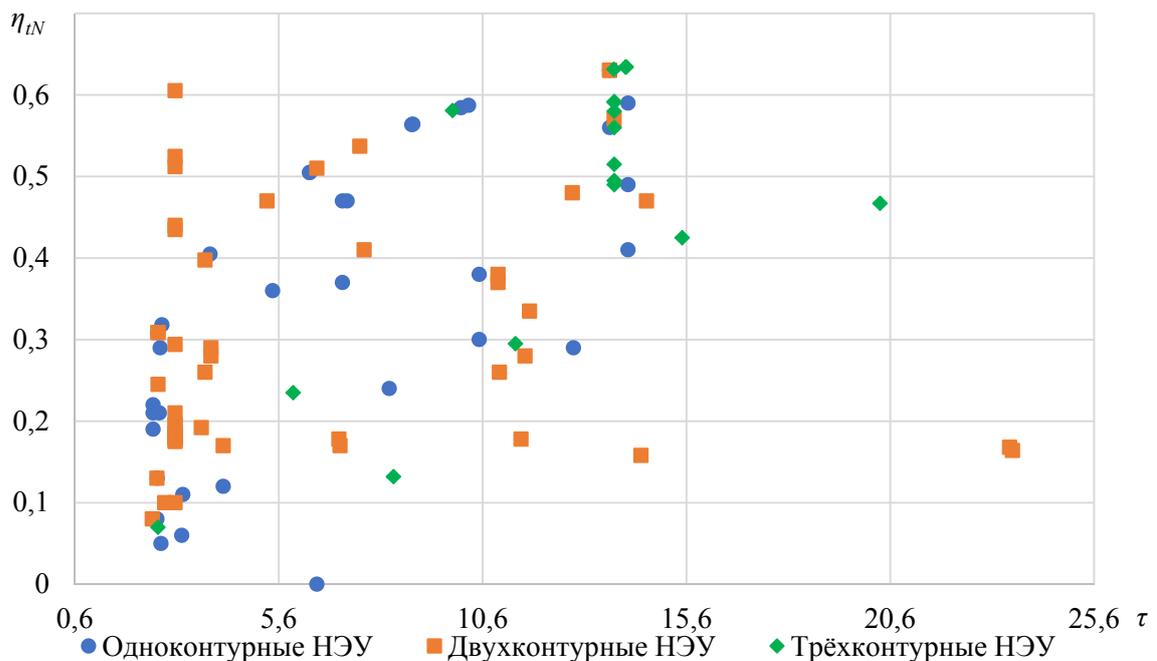


Рис. 4. Зависимость расчётного КПД «карнотизированного» цикла от отношения наибольшей и наименьшей температур цикла низкотемпературных энергетических установок

На рис. 4 представлена зависимость расчётного КПД «карнотизированного» цикла от отношения наибольшей и наименьшей температур цикла НЭУ. По полям характеристик НЭУ можно сделать вывод, что КПД «карнотизированного» цикла ниже теплового КПД, эксергетического КПД и КПД Новикова – Карзона, так как он учитывает тепловые процессы цикла НЭУ.

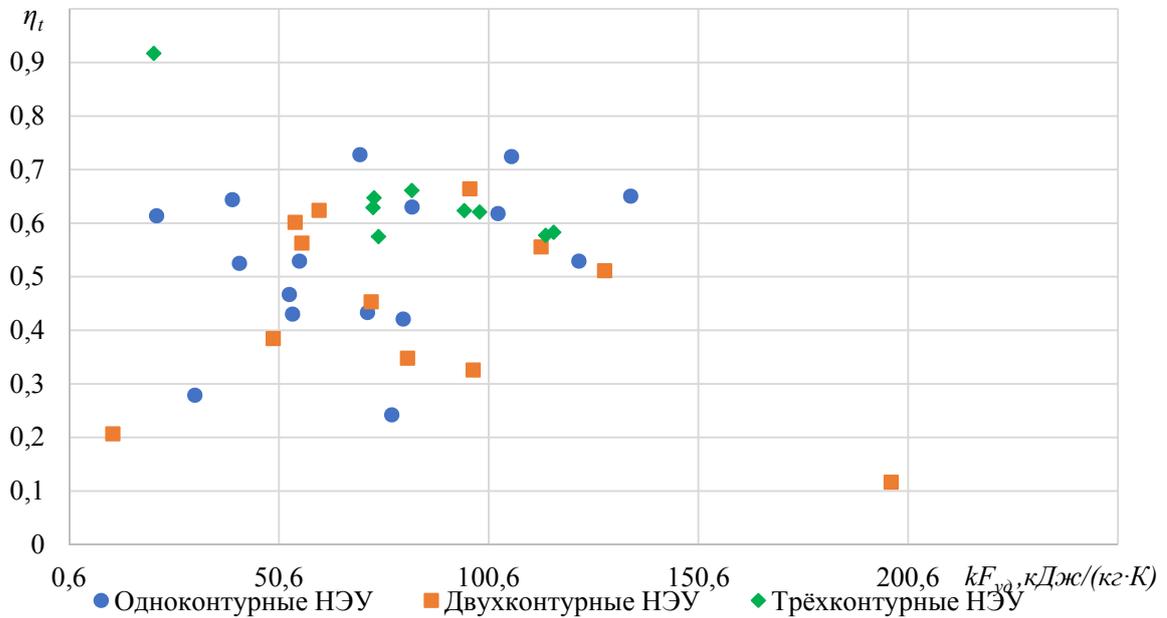


Рис. 5. Зависимость теплового КПД от удельного отношения теплового потока к разнице температур

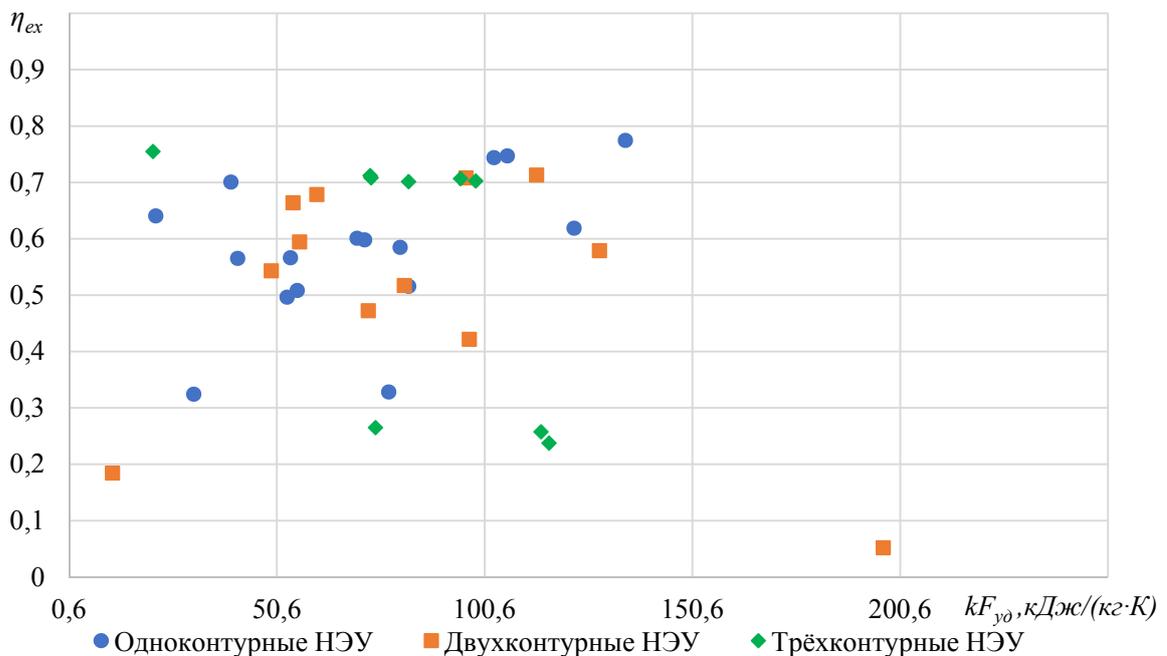


Рис. 6. Зависимость эксергетического КПД от удельного отношения теплового потока к разнице температур

На рис. 5, 6 представлены зависимости теплового КПД и эксергетического КПД от удельного отношения теплового потока к разнице температур. По полям характеристик можно сделать вывод о характере влияния регазифицирующих теплообменных аппаратов на эффективность работы НЭУ.

В результате приведённого расчётного исследования основных параметров низкотемпературных энергетических установок и анализа зависимостей, представленных на рис. 1 – 6, было определено, что наиболее эффективной НЭУ из числа проанализированных является одноконтурная низкотемпературная энергетическая установка, работающая по циклу Брайтона, в которой в качестве рабочего тела используется азот. Удельное отношение теплового потока к разнице температур данной НЭУ составляет $kF_{y0} = 134,51$ кДж/(кг·К), тепловой КПД $\eta_t = 0,65$, а эксергетический КПД $\eta_{ex} = 0,77$.

Заключение

В проведённой работе был проанализирован массив данных НЭУ с различными техническими решениями использования низкопотенциальной энергии криопродукта (преимущественно СПГ). Было определено, что наиболее эффективной НЭУ из числа проанализированных является одноконтурная низкотемпературная энергетическая установка, имеющая удельное отношение теплового потока к разнице температур $kF_{y0} = 134,51$ кДж/(кг·К). При этом тепловой КПД составляет 65%, а эксергетический КПД 77%.

Предложенную методику оценки влияния различных факторов на эффективность работы НЭУ целесообразно использовать на предпроектном этапе её разработки, а метод определения влияния системы регазификации криопродукта на общую эффективность НЭУ – при решении проблемы оптимизации и прогнозирования работы одноконтурных и многоконтурных НЭУ в системах когенерации и тригенерации.

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

Библиографический список

1. Бармин И.В., Кунис И.Д. Сжиженный природный газ вчера, сегодня, завтра. М.: МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2009. 256 с.
2. Uglanov D.A., Manakova O.A., Tremkina O.V., Sarmin D.V. LNG power complex integrated with air separation unit and low-temperature power plant // Proceedings of the 3rd International Conference on Electrical Engineering and Control Technologies, CEECT 2021 (December, 17, 2021, Virtual, Online). 2021. P. 187-190. DOI: 10.1109/CEECT53198.2021.9672328
3. Pan J., Li M., Zhu M., Li R., Tang L., Bai J. Energy, exergy and economic analysis of different integrated systems for power generation using LNG cold energy and geothermal energy // Renewable Energy. 2023. V. 202. P. 1054-1070. DOI: 10.1016/j.renene.2022.12.021
4. Зысин Л.В. Парогазовые и газотурбинные тепловые электростанции: учеб. пособие. СПб: Изд-во Политехнического университета, 2010. 377 с.
5. Злобин В.Г., Верховланцев А.А. Газотурбинные установки. Ч. 1. Тепловые схемы. Термодинамические циклы: учеб. пособие. СПб: Санкт-Петербургский государственный университет промышленных технологий и дизайна, 2020. 114 с.
6. Благин Е.В., Манакова О.А., Трёмкина О.В., Угланов Д.А. Низкотемпературные энергетические установки, использующие низкопотенциальную энергию СПГ (Обзор

публикаций по низкотемпературным энергетическим установкам с целью выявления схемных решений, состава и определения характеристик). Самарский национальный исследовательский университет имени академика С.П. Королева. Самара, 2023. 485 с. Деп. в ВИНТИ РАН 10.04.2023. № 10-B2023. DOI: 10.36535/0202-6120-2023-02-10-2023

7. Архаров А.И., Довгялло А.И., Угланов Д.А., Тремкина О.В. Оценка показателей эффективности схемных решений установок когенерации на базе ГТУ при использовании СПГ в качестве топлива // Химическое и нефтегазовое машиностроение. 2023. № 1-2. С. 25-30.

8. Тремкина О.В., Угланов Д.А., Карнаух В.В. Эксергетический метод оценки эффективности низкотемпературных энергетических установок, использующих низкопотенциальное тепло криопродукта // Сборник научных трудов «Энергоэффективные инженерные системы». СПб: Университет ИТМО, 2024. С. 139-144.

9. Новиков И.И. Эффективный коэффициент полезного действия атомной энергетической установки // Атомная энергия. 1957. Т. 3, № 11. С. 409-412.

10. Curzon F.L., Ahlborn B. Efficiency of a canot engine at maximum power output // American Journal of Physics. 1975. V. 43, Iss. 1. P. 22-24. DOI: 10.1119/1.10023

11. Угланов Д.А. Энергоэффективные системы преобразования низкопотенциальной энергии криопродуктов. Дис. ... докт. техн. наук. Санкт-Петербург, 2022. 689 с.

12. Тремкина О.В. Совершенствование метода определения характеристик низкотемпературных энергоустановок летательных аппаратов. Дис. ... канд. техн. наук. Самара, 2023. 178 с.

13. Манакова О.А., Угланов Д.А., Благин Е.В., Паньшин Р.А., Тремкина О.В. Оценка влияния различных факторов на эффективность работы низкотемпературных энергетических установок // Сб. докладов Международной научно-технической конференции «Проблемы и перспективы развития двигателестроения» (23-25 июня 2021 г., Самара). Т. 2. Самара: Издательство Самарского университета, 2021. С. 213-214.

14. Krey G. Utilization of the cold by LNG vaporization with closed-cycle gas turbine // Journal of Engineering for Power. 1980. V. 102, Iss. 2. P. 225-230. DOI: 10.1115/1.3230241

15. Weber D. Recovery of energy from LNG vaporization // Proceedings of the International Seminar «New Ways to Save Energy» (October, 23-25, 1979, Brussel). 1980. P. 755-765. DOI: 10.1007/978-94-009-8990-0_81

16. Najjar Y.S.H. A cryogenic gas turbine engine using hydrogen for waste heat recovery and regasification of LNG // International Journal of Hydrogen Energy. 1991. V. 16, Iss. 2. P. 129-134. DOI: 10.1016/0360-3199(91)90039-1

17. Bisio G. Diesel engine and closed cycle gas turbine with the exploitation of LNG physical exergy // Intersociety Energy Conversion Engineering Conference (August, 07-12, 1994, Monterey, CA, U.S.A.). 1994. P. 944-950. DOI: 10.2514/6.1994-3986

18. Wong W. LNG power recovery // Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part A: Journal of Power and Energy. 1994. V. 208, Iss. 1. P. 3-12. DOI: 10.1243/PIME_PROC_1994_208_003_02

19. Chiesa P. LNG receiving terminal associated with gas cycle power plants // Proceedings of the ASME Turbo Expo (June, 2-5, 1997, Orlando, Florida, USA). 1997. V. 2. DOI: 10.1115/97-GT-441

EVALUATION OF THE INFLUENCE OF VARIOUS FACTORS ON THE PRODUCTIVITY IN LOW-TEMPERATURE POWER PLANTS

© 2024

- O. V. Tremkina** Candidate of Science (Engineering), Associate Professor of the Department of Heat Engineering and Heat Engines; Samara National Research University, Samara, Russian Federation; tereshchenko.ov@ssau.ru
- E. V. Blagin** Candidate of Science (Engineering), Associate Professor of the Department of Heat Engineering and Heat Engines, Researcher at the Scientific and Educational Center for Gas Dynamic Research; Samara National Research University, Samara, Russian Federation; blagin.ev@ssau.ru
- R. A. Panshin** Junior Researcher at the Scientific and Educational Center for Gas Dynamic Research; Samara National Research University, Samara, Russian Federation; panshinroman2016@yandex.ru
- V. I. Shikhalev** Engineer at the Scientific and Educational Center for Gas Dynamic Research; Samara National Research University, Samara, Russian Federation; shikhalev.vi@ssau.ru

The use of natural gas as a fuel is a current direction of the development of modern power plants. The proposed methodology evaluates the influence of various factors on the operating efficiency of low-temperature power plants using the example of the influence of heat flows of heat exchangers; a comparative analysis of the operating parameters and characteristics of heat vaporizer exchangers in the systems of storage of liquefied natural gas and power plants using low-potential energy of a cryogenic product was also carried out. An analysis of the array of data obtained from various articles is given, describing the state of complexes that use low-potential heat of the cryogenic product. A method for assessing the influence of a cryogenic product regasification system on the overall efficiency of power plants and systems is also described.

Low-temperature power plant; low-potential energy; cryogenic product; liquefied natural gas; regasification

Citation: Tremkina O.V., Blagin E.V., Panshin R.A., Shikhalev V.I. Evaluation of the influence of various factors on the productivity in low-temperature power plants. *Vestnik of Samara University. Aerospace and Mechanical Engineering*. 2024. V. 23, no. 3. P. 180-190. DOI: 10.18287/2541-7533-2024-23-3-180-190

References

1. Barmin I.V., Kunis I.D. *Szhizhennyy prirodnyy gaz vchera, segodnya, zavtra* [Liquefied natural gas yesterday, today, tomorrow]. Moscow: Bauman Moscow State Technical University Publ., 2009. 256 p.
2. Uglanov D.A., Manakova O.A., Tremkina O.V., Sarmin D.V. LNG power complex integrated with air separation unit and low-temperature power plant. *Proceedings of the 3rd International Conference on Electrical Engineering and Control Technologies, CEECT 2021 (December, 17, 2021, Virtual, Online)*. 2021. P. 187-190. DOI: 10.1109/CEECT53198.2021.9672328
3. Pan J., Li M., Zhu M., Li R., Tang L., Bai J. Energy, exergy and economic analysis of different integrated systems for power generation using LNG cold energy and geothermal energy. *Renewable Energy*. 2023. V. 202. P. 1054-1070. DOI: 10.1016/j.renene.2022.12.021
4. Zysin L.V. *Parogazovye i gazoturbinnnye teplovye elektrostantsii: ucheb. posobie* [Steam and gas and gas turbine thermal power plants: textbook]. SPb: Polytechnic University Publ., 2010. 377 p.
5. Zlobin V.G., Verkholtantsev A.A. *Gazoturbinnnye ustanovki. Ch. 1. Teplovye skhemy. Termodinamicheskie tsikly: ucheb. posobie* [Gas turbine units. Part 1. Heat balance diagrams.

Thermodynamic cycles: textbook]. SPb: Saint Petersburg State University of Industrial Technologies and Design Publ., 2020. 114 p.

6. Blagin E.V., Manakova O.A., Tremkina O.V., Uglanov D.A. Cold energy power plants using cold energy LNG energy (Review of publications on low-temperature power plants in order to identify circuit solutions, composition, and characteristics). Samara National Research University. Samara, 2023. 485 p. Dep. VINITI RAN 10.04.2023. No. 10-B2023. DOI: 10.36535/0202-6120-2023-02-10-2023

7. Arkharov I.A., Dovgyallo A.I., Uglanov D.A., Tremkina O.V. Assessing the efficiency of circuit solutions for LNG-fueled GTP-based cogeneration plants. *Chemical and Petroleum Engineering*. 2023. V. 59, Iss. 1-2. P. 47-58. DOI: 10.1007/s10556-023-01207-3

8. Tremkina O.V., Uglanov D.A., Karnaukh V.V. Eksperimetalnyi metod otsenki effektivnosti nizkotemperaturnykh energeticheskikh ustanovok, ispol'zuyushchikh nizkopotentsial'noe teplo krioproducta. *Sbornik nauchnykh trudov «Energoeffektivnye Inzhenernye Sistemy»*. SPb: ITMO University Publ., 2024. P. 139-144. (In Russ.)

9. Novikov I.I. Efficiency of an atomic power generating installation. *The Soviet Journal of Atomic Energy*. 1957. V. 3, Iss. 11. P. 1269-1272. DOI: 10.1007/BF01507240

10. Curzon F.L., Ahlborn B. Efficiency of a canot engine at maximum power output. *American Journal of Physics*. 1975. V. 43, Iss. 1. P. 22-24. DOI: 10.1119/1.10023

11. Uglanov D.A. *Energoeffektivnye sistemy preobrazovaniya nizkopotentsial'noy energii krioproductov. Dis. ... dokt. tekhn. nauk* [Energy-efficient of cold energy conversion systems for cryoproducts. Doc. eng. sci. diss.]. Saint Petersburg, 2022. 689 p.

12. Tremkina O.V. *Sovershenstvovanie metoda opredeleniya kharakteristik nizkotemperaturnykh energoustanovok letatel'nykh apparatov. Dis. ... kand. tekhn. nauk* [Improving the method for determining the characteristics of low-temperature aircraft power plants. Thesis for a Candidate Degree (Engineering)]. Samara, 2023. 178 p.

13. Manakova O.A., Uglanov D.A., Blagin E.V., Panshin R.A., Tremkina O.V. Evaluation of the influence of various factors on productivity in low-temperature power plants. *Proceedings of the International Scientific and Practical Conference «Prospects for the Development of Engine Building» (June, 23-25, 2021, Samara)*. V. 2. Samara: Samara University Publ., 2021. P. 213-214. (In Russ.)

14. Krey G. Utilization of the cold by LNG vaporization with closed-cycle gas turbine. *Journal of Engineering for Power*. 1980. V. 102, Iss. 2. P. 225-230. DOI: 10.1115/1.3230241

15. Weber D. Recovery of energy from LNG vaporization. *Proceedings of the International Seminar «New Ways to Save Energy» (October, 23-25, 1979, Brussel)*. 1980. P. 755-765. DOI: 10.1007/978-94-009-8990-0_81

16. Najjar Y.S.H. A cryogenic gas turbine engine using hydrogen for waste heat recovery and regasification of LNG. *International Journal of Hydrogen Energy*. 1991. V. 16, Iss. 2. P. 129-134. DOI: 10.1016/0360-3199(91)90039-1

17. Bisio G. Diesel engine and closed cycle gas turbine with the exploitation of lng physical exergy. *Intersociety Energy Conversion Engineering Conference (August, 07-12, 1994, Monterey, CA, U.S.A.)*. 1994. P. 944-950. DOI: 10.2514/6.1994-3986

18. Wong W. LNG power recovery. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part A: Journal of Power and Energy*. 1994. V. 208, Iss. 1. P. 3-12. DOI: 10.1243/PIME_PROC_1994_208_003_02

19. Chiesa P. LNG receiving terminal associated with gas cycle power plants. *Proceedings of the ASME Turbo Expo (June, 2-5, 1997, Orlando, Florida, USA)*. 1997. V. 2. DOI: 10.1115/97-GT-441