

УДК 621.311.61, 656.025.4

Оптимизация перевозок термочувствительных грузов в рефрижераторных контейнерах с применением альтернативных источников энергии

И. Г. Киселев, С. Б. Комиссаров, Д. Я. Монастырский

Петербургский государственный университет путей сообщения Императора Александра I, Россия, 190031, Санкт-Петербург, Московский пр., 9

Для цитирования: Киселев И. Г., Комиссаров С. Б., Монастырский Д. Я. Оптимизации перевозок термочувствительных грузов в рефрижераторных контейнерах с применением альтернативных источников энергии // Известия Петербургского университета путей сообщения. СПб.: ПГУПС, 2024. Т. 21, вып. 1. С. 229–237. DOI: 10.20295/1815-588X-2024-01-229-237

Аннотация

Цель: рассмотреть основные проблемы перевозки термочувствительных грузов в рефрижераторных контейнерах (рефконтейнеры), показать возможности оптимизации перевозок путем внедрения альтернативных источников энергии. **Метод:** выполнено сравнение технико-экономических показателей дизельных, водородных установок. Применен эксергетический метод оценки эффекта от замены дизельного топлива на СПГ. **Результаты:** в статье определены особенности перевозки грузов в контейнерах со встроенными холодильными установками — автономными рефконтейнерами. Приведена классификация существующих энергоустановок для электропитания рефконтейнеров. Описана конструкция автономной установки для энергоснабжения рефконтейнеров. Предложены экологически безопасные альтернативы для обеспечения автономного электропитания холодильных установок рефконтейнеров. Представлены преимущества автономного источника электропитания на основе высокотемпературных топливных элементов. Описана автономная энергоустановка со сжиженным природным газом (СПГ) в качестве топлива. Проанализирована целесообразность утилизации холода от регазификации СПГ с целью обеспечения стабильности функционирования рефконтейнера. Сделана оценка предполагаемого эффекта от применения альтернативных видов топлива для автономного электропитания. **Практическая значимость:** полученные результаты могут быть использованы для модернизации энергетических установок малой мощности, применяемых на рефрижераторном и других видах транспорта.

Ключевые слова: автономные энергоустановки, высокотемпературные топливные элементы, сжиженный природный газ, холодильный транспорт, автономные рефконтейнеры.

Введение

Согласно актуальным данным, до трети всех производимых продуктов питания утрачивают качественные характеристики во время перевозки [1]. К примеру, на железнодорожном транспорте в Российской Федерации ежегодно теряется от 4 до 15% замороженной рыбы, что приносит убытки миллионы рублей и вынуждает Правитель-

ство Российской Федерации предоставлять субсидии перевозчикам [2]. Среди основных причин потерь — нарушения предписанных процедур в пути следования, нарушение техники погрузочно-разгрузочных работ, прохождение через неучтенные климатические зоны, неисправности оборудования и человеческий фактор [3]. Для снижения

потерь все чаще используются автономные рефконтейнеры со встроенной холодильной установкой в комплексе с дизельным генератором. Энергетическая автономность рефконтейнера обеспечивает сохранность груза при мультимодальных перевозках и сокращает время доставки за счет применения контейнерных поездов вместо формирования традиционных рефрижераторных сцепов с вагоном-электростанцией или отсутствия необходимости подключения вагонов к сети контейнеровоза или промежуточного пункта.

Современная энергетическая повестка поднимает вопрос о своевременной адаптации электропитания рефконтейнеров для обеспечения стабильности функционирования задействованных энергосистем.

Электропитание автономных рефконтейнеров дизельными установками

Современные дизельные установки для электроснабжения специальных контейнеров могут быть встроенными или навесными.

Потребляемая электрическая мощность холодильных установок рефконтейнеров сравнительно невелика, до 24 кВт, поэтому наибольшее распространение получили мобильные навесные дизельные генераторы (дженсеты). Указанные установки отличаются значительным уровнем шума (70–110 дБ), сложностью конструкции, дорогостоящим обслуживанием и значительной снаряженной массой — до 1,5 тонны (табл. 1).

В дизельных выбросах содержатся оксиды углерода, азота, диоксида серы, сажа и другие загрязняющие атмосферу вещества, что не соответствует экологическим инициативам ведущих экономик мира, принятым в рамках Парижского соглашения 2015 года. Для приведения дизельного топлива к стан-

ТАБЛИЦА 1. Технические характеристики дизельного дженсета

Показатель	Значение
Номинальная мощность	15,4 кВт
Расход топлива (плотность 860 кг/м ³)	3,5 л/ч
Масса дженсета без топлива	830 кг
Объем бака	492 л

дартам «Евро-5» применяются дорогостоящие присадки и технологически сложные системы нейтрализации выбросов, что, в свою очередь, повышает цены на топливо и оборудование.

Электропитание автономных рефконтейнеров водородными установками

Для электропитания рефконтейнеров подходят любые топливные элементы, но в первую очередь благодаря своим характеристикам рассматриваются твердооксидные топливные элементы (ТОТЭ), питаемые водородом любого качества, метаном, синтез-газом и другими видами топлива [4]. ТОТЭ отличаются высокими рабочими температурами в интервале от 650 до 1000 °С. В контексте рефрижераторов охлаждение ТОТЭ обеспечивается утилизацией сбросной тепловой энергии через контур охлаждения к абсорбционной холодильной машине (АБХМ) для производства холода (рис. 1).

Целесообразность утилизации сбросной теплоты ТОТЭ к АБХМ при рефрижераторных перевозках автотранспортом изучена и подтверждена [5]. Объемы энергии холода, производимого системой охлаждения блока, достаточно для окупаемости работы малогабаритной установки (табл. 2).

Работа установки исключает прямые выбросы оксидов серы и монооксида углерода,

ТАБЛИЦА 2. Основные показатели установки ТОТЭ-АБХМ

Объем холодильника	Холодопроизводительность (кВт)	Количество ячеек (шт.)	Номинальная мощность блока (кВт)	Цена когенерации (руб./кВт·ч)	Эффективность когенерации (%)
Малый	1	80	3,3	12	46,21
Средний	4	285	12,8	11	46,21
Большой	6	440	18,7	10	46,21
Эквивалентные выбросы CO ₂ при сжигании синтез-газа					
Плотность тока 0,1 А/см ²		Плотность тока 1,4 А/см ²		Вес энергоустановки: 62 кг на 100 ячеек Стоимость: 170 тыс. руб. за 1 кВт	
0,38 кг/ кВт·ч		0,82 кг/ кВт·ч			

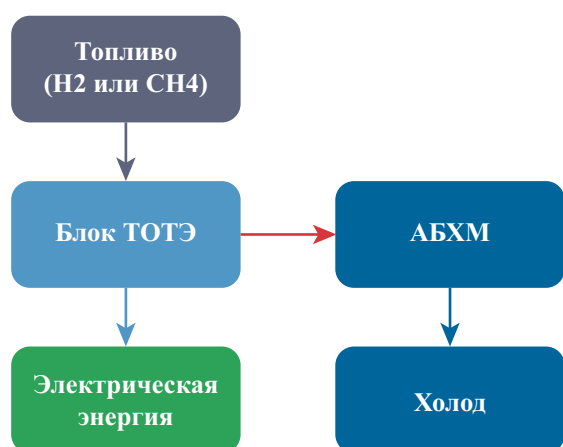


Рис. 1. Функциональная схема установки ТОТЭ-АБХМ

однако остаются косвенные выбросы парниковых газов, неизбежные при производстве топливных элементов.

Передаваемой от ТОТЭ к АБХМ энергии достаточно для резервного холодоснабжения в случае выхода из строя основной установки рефконтейнера. Потенциал ТОТЭ дополнительно раскрывается при оснащении установок литийионными аккумуляторами для обеспечения бесперебойного питания и с интеграцией умных сетей: модульная компоновка топливных элементов повышает надежность системы электропитания и эффективность распределения ресурсов благодаря вычислительному модулю.

Энергоустановка со сжиганием СПГ

Второй источник энергии — сжиженный природный газ, в первую очередь за счет государственной ориентации на увеличение его производства [6]. В 2022 году выпуск СПГ в Российской Федерации достиг 32,5 млн т. К 2035 году поставлена цель нарастить производство до 120–140 млн т в год [7]. С развитием инфраструктуры открывается возможность по переходу от дизельных дженсетов к газовым с использованием СПГ.

Сжигание СПГ в установках малой мощности исключает выбросы серы и твердых частиц, снижая экологическую нагрузку на окружающую среду [8]. Кроме потенциала углеродного топлива, в СПГ хранится запас энергии, накопленный в процессе сжижения. Затраты энергии W для сжижения СПГ, представляемые как термомеханическая эксергия, или эксергия холода, оцениваются с помощью формулы:

$$\begin{aligned}
 \delta W_{max} &= \delta q - \delta h = T_0 ds - dh \\
 e &= (h_s - h_0) + T_0 (s_0 - s_s) = \\
 &= C_p (T_s - T_0) + T_0 \int_{T_s}^{T_0} \frac{\delta q}{T} - RT_0 \int_{p_s}^{p_0} \frac{\delta p}{p} = \\
 &= C_p (T_s - T_0) + C_p T_0 \ln \frac{T_0}{T_s} - RT_0 \ln \frac{p_s}{p_0},
 \end{aligned}$$

где первые два члена уравнения выражают термическую эксергию, а последний член выражает эксергию давления. При стандартных условиях $T_0 = 20\text{ °C}$ и атмосферном давлении P_0 энтальпия метана $h_1 = 10\text{ кДж/кг}$; при -162 °C и 1 бар энтальпия СПГ $h_2 = 1005\text{ кДж/кг}$.

Часть этой эксергии можно использовать для полезной работы. Исключив эксергию давления, доступная тепловая энергия от регазификации определяется в диапазоне от 900 до 925 кДж/кг [9–10]. Сравнение холодопроизводительности регазификации от СПГ и парокомпрессионного холодильного цикла представлено на рис. 2. В процессе регазификации подогрев СПГ осуществляется за счет тепловых поступлений из рефконтейнера че-

рез теплообменник. Учитывая неизбежные потери при передаче энергии, рекуперации холода от СПГ обеспечит производство холода в объеме от 214 до 380 кДж/кг СПГ в зависимости от КПД теплообменника [11].

В работах [12–13] рассматривается эффект от протекания СПГ через теплообменники, расположенные на торцевой поверхности и под крышей. На рис. 3 представлена схема установки теплообменников в торцевой части кузова.

При расходе 5,6 кг/ч СПГ целиком заменяет холодильную установку: время снижения температуры от $+28$ до -20 °C занимает 2,5 часа. Достигнутая холодопроизводительность 1,2 кВт сопоставима с мощностью авторефрижераторов, чей рабочий диапазон

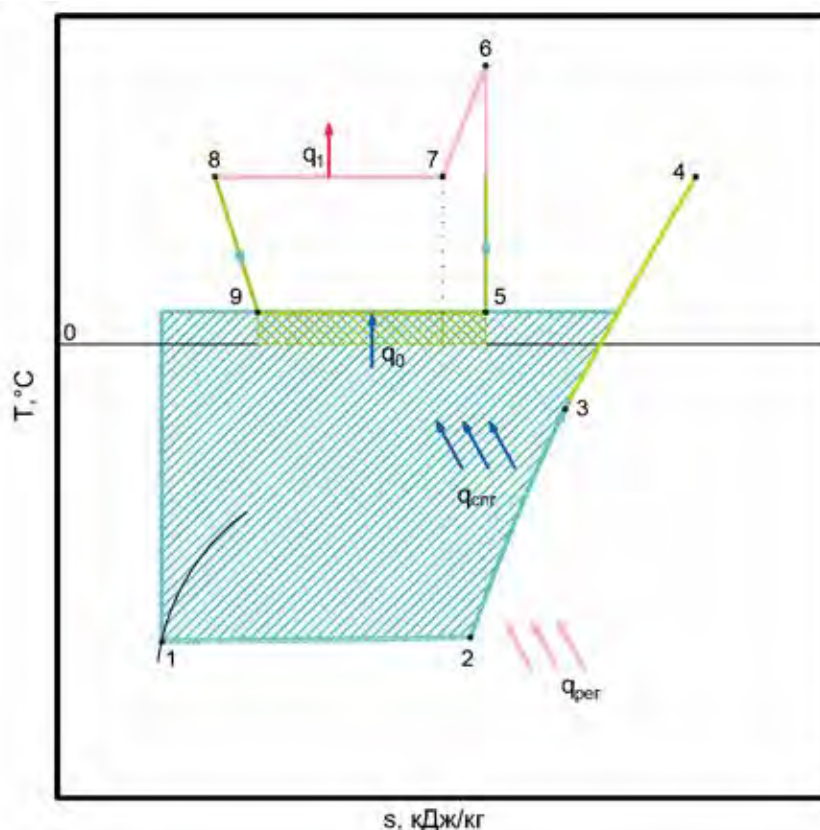


Рис. 2. Комбинированный парокомпрессионный холодильный цикл (5–6–7–8–9) с утилизацией холода от регазифицируемого СПГ (1–2–3–4)

холодильных мощностей составляет от 0,8 до 3 кВт. Связь теоретического расхода СПГ с холодопроизводительностью приведена на графике (рис. 4).

Холодильные установки для рефрижераторных контейнеров требуют мощности от 16 до 24 кВт. Состав типовой энергоустановки на СПГ приведен в табл. 3.

Как и в случае с топливными элементами, установки на СПГ способны компенсировать неучтенные тепловые поступления, а также частично заменить основную холодильную установку в аварийной ситуации.

При использовании энергоустановок указанного типа также возможно распыление криогенной жидкости непосредственно

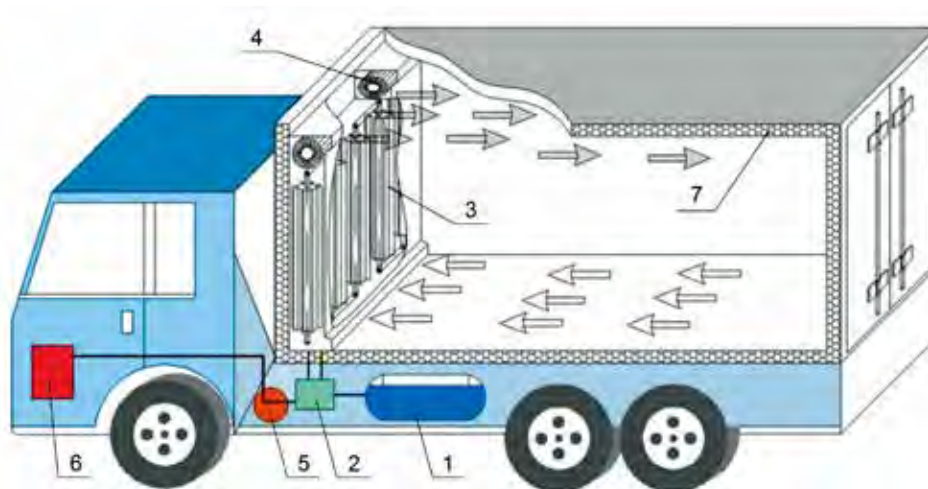


Рис. 3. Принципиальная схема СПГ-авторефрижератора малой грузоподъемности: 1 — бак СПГ; 2 — газовый мультиблок; 3 — теплообменник рекуперации холодной энергии; 4 — вытяжной вентилятор; 5 — пароперегреватель; 6 — двигатель; 7 — холодильная камера

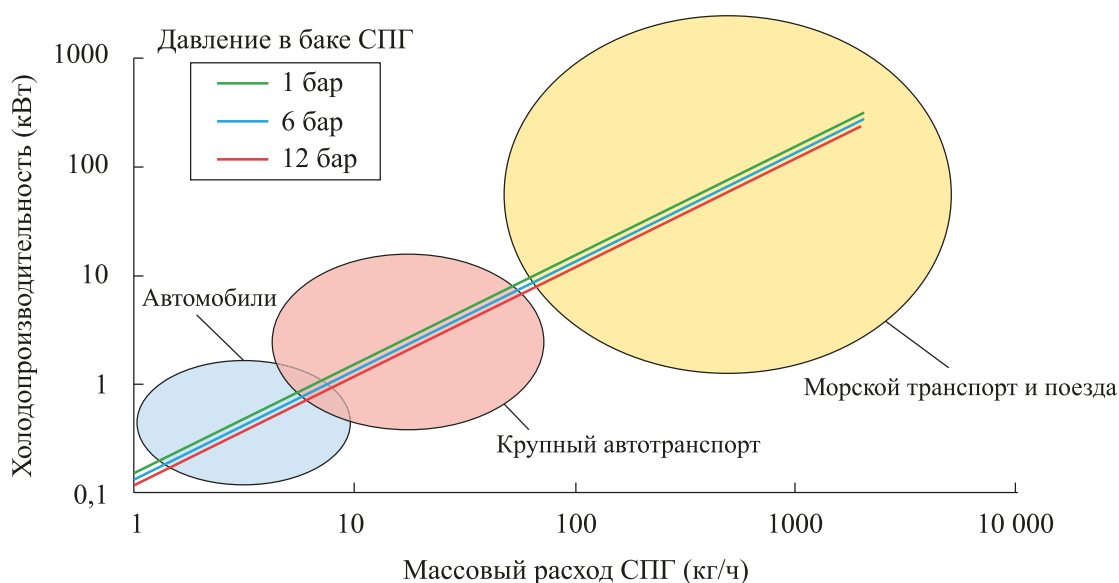


Рис. 4. Холодопроизводительность СПГ в зависимости от массового расхода топлива

в камеру с грузом без достижения взрывоопасной концентрации метана. Необходимо отметить, что выбросы CO_2 при распылении соответствуют выбросами от прямого сжигания СПГ или дизельного топлива стандарта ДТ «Евро-5» (табл. 4).

ТАБЛИЦА 3. Технические характеристики СПГ-энергоустановки

Оборудование / характеристика	Значение
1. Генератор (ФАС-18-1/ВР)	
Номинальная мощность, кВт	18
Расход газа (плотность 0,42 кг/м ³), л/ч	11,1
Масса генератора, кг	530
2. Криобак (LNG530L, СТФК «КамАЗ»)	
Объем, л	530
Снаряженная масса, кг	~ 300
Рабочее давление, МПа	1,6
3. Газовый мультиблок	
Рабочее давление на входе, МПа	до 40
Давление на выходе, МПа	до 3,5
Рабочая температура, °С	285

ТАБЛИЦА 4. Техничко-экономическое сравнение ДТ и СПГ

Характеристика	ДТ «Евро-5»	СПГ
Удельная теплота сгорания, кДж/кг	42 700	48 500
Доля содержания углерода	0,875	0,75
Расход, л/ч	3,5	11,1
Стоимость топлива, руб./л	55,0	14,7
Расчет затрат на 1 час работы, руб./ч	192,5	163,2
Холодопроизводительность, кДж/л	–	от 94,0 до 373,5
Выбросы CO_2	708 г/кВт	696 г/кВт

Выводы

Перехода от дизельного топлива на ТОТЭ возможен при условии дальнейшего развития водородной энергетики и удешевления производства электрохимических устройств на основе твердотопливных элементов. Тем не менее уже сейчас автономные установки ТОТЭ открывают опции по ресурсосбережению и повышению экологической безопасности перевозок там, где необходимы компактные решения и надежное электро- и холодоснабжение в целях сохранности термочувствительных грузов.

В рамках перехода к декарбонизированному производству энергии традиционные дизельные энергетические системы могут быть заменены промежуточными, экологически безопасными и экономически целесообразными альтернативами, такими как СПГ. Холодильный потенциал от регазификации СПГ позволит избежать перерасхода энергии и косвенных выбросов, связанных с перепроизводством с целью компенсации потери продуктов во время перевозки.

Библиографический список

- Bergeret P. The future of food and agriculture: Trends and challenges [Note de lecture] // *Bibliographic prospective*. 2017. No. 29/09. P. 3.
- Постановление Российской Федерации от 26 июля 2021 г. № 1267 «О внесении изменений в постановление Правительства Российской Федерации от 6 апреля 2019 г. № 406» [Электронный ресурс]. URL: <http://publication.pravo.gov.ru/document/0001202107260038> (дата обращения: 27.09.2023).
- Боровикова М.С. Организация перевозочного процесса на железнодорожном транспорте: учебник. М.: Издательский дом «Автограф», 2014. 368 с.

4. Жузев А., Тертышников М. В. Топливные элементы: состояние и перспективы // Энергетика Тюменского региона. 2002. № 3. С. 170.
5. Pandya B., El-Kharouf A., Venkataraman V., et al. Comparative study of solid oxide fuel cell coupled absorption refrigeration system for green and sustainable refrigerated transportation // Applied Thermal Engineering. 2020. Vol. 179. P. 115597.
6. Динамика промышленного производства в 2022 году [Электронный ресурс]. URL: <https://rosstat.gov.ru/folder/313/document/196621> (дата обращения: 27.09.2023).
7. Владимир Путин: «Рассчитываем к 2035 году выйти на уровень производства СПГ в 120–140 миллионов тонн в год» [Электронный ресурс]. URL: <https://minenergo.gov.ru/node/15959> (дата обращения: 27.09.2023).
8. Колин С. А. К вопросу оценки экономических издержек от загрязнения воздуха городским транспортом (на примере Санкт-Петербурга) / С. А. Колин, С. Е. Кондратенко, Н. А. Бортников // Газовая промышленность. 2021. № 6. С. 98–104.
9. Киселев И. Г., Комиссаров С. Б., Монастырский Д. Я. О целесообразности использования сжиженного природного газа на рефрижераторных контейнерах с навесными дизель-генераторами // Бюллетень результатов научных исследований. 2021. № 4. С. 104–113.
10. Gerasimov V. E., Kuz'menko I. F., Pere-del'skii V. A., et al. Introduction of technologies and equipment for production, storage, transportation, and use of LNG // Chemical and petroleum engineering. 2004. Т. 40. № 1–2. P. 31–35.
11. Dorosz P., Wojcieszak P., Malecha Z. Exergetic analysis, optimization and comparison of LNG cold exergy recovery systems for transportation / P. Dorosz, P. Wojcieszak, Z. Malecha // Entropy. 2018. Т. 20. № 1. С. 59.
12. Tan H., Li Y., Tuo H., et al. Experimental study on liquid/solid phase change for cold energy storage of Liquefied Natural Gas (LNG) refrigerated vehicle // Energy. 2010. Т. 35. № 5. P. 1927–1935.
13. Wang F., Li M., Zhang Y., et al. Study on roof-mounted radiant cooling system for LNG-fueled refrigerated vehicles // International Journal of Low-Carbon Technologies. 2021. Т. 16. № 2. P. 268–274.

Дата поступления: 30.11.2023

Решение о публикации: 13.11.2024

Контактная информация:

КИСЕЛЕВ Игорь Георгиевич — докт. техн. наук, профессор; toe@pgups.ru

КОМИССАРОВ Сергей Борисович — канд. техн. наук; s.b.komissarov@gmail.com

МОНАСТЫРСКИЙ Дмитрий Ярославович — аспирант; monastyrskiy.dy@mail.ru

Alternative energy sources for transporting thermosensitive goods in autonomous refrigerated containers

I. G. Kiselev, S. B. Komissarov, D. Ya. Monastyrsky

Emperor Alexander I Petersburg State Transport University, 9, Moskovsky pr., Saint Petersburg, 190031, Russia

For citation: Kiselev I. G., Komissarov S. B., Monastyrsky D. Ya. Alternative energy sources for transporting thermosensitive goods in autonomous refrigerated containers // Proceedings of Petersburg Transport University. 2024. Vol. 21, iss. 1. P. 229–237. DOI: 10.20295/1815-588X-2024-01-229-237

Abstract

Purpose: to consider the main problems of transportation of temperature-sensitive cargoes in refrigerated containers (refcontainers). To show the possibilities of transportation optimization through the introduction of alternative energy sources. **Methods:** comparison of technical and economic indicators of diesel, hydrogen and hydrogen plants is carried out. The exergetic method of estimating the effect of replacing diesel fuel with LNG was applied. **Results:** the article defines the peculiarities of cargo transportation in containers with built-in refrigeration units — autonomous refcontainers. Classification of existing energy units for power supply of refcontainers is given. The design of an autonomous installation for power supply of refcontainers is described. Environmentally safe alternatives for providing autonomous power supply of refrigerating units of refrigeration containers are proposed. The advantages of autonomous power supply based on high-temperature fuel cells are presented. An autonomous power unit with liquefied natural gas (LNG) as fuel is described. The feasibility of utilization of cold from LNG regasification is analyzed in order to ensure the stability of refcontainer operation. The estimation of the expected effect from the use of alternative fuels for autonomous power supply is made. **Practical significance:** the obtained results can be used for modernization of low-capacity power plants used in refrigerated and other types of transport.

Keywords: autonomous power units, high-temperature fuel cells, liquefied natural gas, refrigerated transport, autonomous refcontainers.

References

1. Bergeret P. The future of food and agriculture: Trends and challenges [Note de lecture] // Bibliographie prospective. 2017. No. 29/09. P. 3.
2. Postanovlenie Rossijskoj Federacii ot 26 ijulja 2021 g. № 1267 “O vnesenii izmenenij v postanovlenie Pravitel’stva Rossijskoj Federacii ot 6 aprelja 2019 g. № 406” [Jelektronnyj resurs]. URL: <http://publication.pravo.gov.ru/document/0001202107260038> (data obrashhenija: 27.09.2023). (In Russian)
3. Borovikova M. S. Organizacija perevoznochnogo processa na zheleznodorozhnom transporte: uchebnik. M.: Izdatel’skij dom “Avtograf”, 2014. 368 s. (In Russian)
4. Zhuzev A., Tertyshnikov M. V. Toplivnye jelementy : sostojanie i perspektivy // Jenergetika Tjumenskogo regiona. 2002. № 3. S. 170. (In Russian)
5. Pandya B., El-Kharouf A., Venkataraman V., et al. Comparative study of solid oxide fuel cell coupled absorption refrigeration system for green and sustainable refrigerated transportation // Applied Thermal Engineering. 2020. T. 179. P. 115597.
6. Dinamika promyshlennogo proizvodstva v 2022 godu [Jelektronnyj resurs]. URL: <https://rosstat.gov.ru/folder/313/document/196621> (data obrashhenija: 27.09.2023). (In Russian)
7. Vladimir Putin: “Rasschityvaem k 2035 godu vyjti na uroven’ proizvodstva SPG v 120–140 millionov tonn

v god” [Elektronnyj resurs]. URL: <https://minenergo.gov.ru/node/15959> (data obrashhenija: 27.09.2023). (In Russian)

8. Kolin S. A. K voprosu ocenki jekonomicheskikh izderzhok ot zagrjaznenija vozduha gorodskim transportom (na primere Sankt-Peterburga) / S.A. Kolin, S. E. Kondratenko, N. A. Bortnikov // *Gazovaja promyshlennost’*. 2021. № 6. S. 98–104. (In Russian)

9. Kiselev I. G., Komissarov S. B., Monastyrskij D. Ja. O celesoobraznosti ispol’zovanija szhizhenogo prirodno go gaza na refrizheratornyh kontejnerah s navesnymi dizel’-generatorami // *Bjulleten’ rezul’tatov nauchnyh issledovanij*. 2021. № 4. S. 104–113. (In Russian)

10. Gerasimov V. E., Kuz’menko I. F., Pere-del’skii V. A., et al. Introduction of technologies and equipment for production, storage, transportation, and use of LNG // *Chemical and petroleum engineering*. 2004. T. 40. № 1–2. P. 31–35.

11. Dorosz P., Wojcieszak P., Malecha Z. Exergetic analysis, optimization and comparison of LNG cold

exergy recovery systems for transportation // *Entropy*. 2018. T. 20. № 1. S. 59.

12. Tan H., Li Y., Tuo H., et al. Experimental study on liquid/solid phase change for cold energy storage of Liquefied Natural Gas (LNG) refrigerated vehicle // *Energy*. 2010. T. 35. № 5. P. 1927–1935.

13. Wang F., Li M., Zhang Y., et al. Study on roof-mounted radiant cooling system for LNG-fueled refrigerated vehicles // *International Journal of Low-Carbon Technologies*. 2021. T. 16. № 2. P. 268–274.

Received: 30.11.2023

Accepted: 13.11.2024

Author’s information:

Igor’ G. KISELEV — Dr. Sci. in Engineering, Professor; toe@pgups.ru;

Sergej B. KOMISSAROV — PhD in Engineering; s.b.komissarov@gmail.com;

Dmitrij Ya. MONASTYRSKIJ — Postgraduate Student; monastyrskiy.dy@mail.ru