

Рубрика 2. НАУЧНЫЕ И ПРАКТИЧЕСКИЕ РАЗРАБОТКИ

Направление – Электротехнические комплексы и системы

<https://doi.org/10.17816/transsyst681999>

Труды III конференции с международным участием «Проблемы безопасности и эффективности технических систем», посвященной 205-й годовщине начала научно-педагогической деятельности Бенуа Поля Эмиля Клапейрона в Институте Корпуса инженеров путей сообщения

© Д.Я. Монастырский, И.Г. Киселев

Петербургский государственный университет путей сообщения

Императора Александра I

(Санкт-Петербург, Россия)

ЭФФЕКТИВНОСТЬ ПРИМЕНЕНИЯ УТИЛИЗАЦИИ ХОЛОДА СПГ В АВТОНОМНЫХ РЕФРИЖЕРАТОРНЫХ КОНТЕЙНЕРАХ

Цель. В статье рассматриваются технологические особенности утилизации холода сжиженного природного газа (СПГ) от топливной системы автономного рефрижераторного контейнера (рефконтейнера). Оценить эффективность использования холода от СПГ.

Материалы и методы. Для достижения поставленной цели проведена оценка холодильного потенциала от регазификации запаса СПГ и выполнен теплотехнический расчет холодильной установки.

Результаты. Описана каскадная холодильная установка с контурами СПГ и диоксидом углерода. Представлена оценка предполагаемого эффекта использования холода при регазификации СПГ в системе холодоснабжения рефрижератора.

Заключение. Полученные результаты позволяют оценить эффективность использования холодильного потенциала СПГ для транспортных рефрижераторных систем.

Ключевые слова: автономные энергоустановки; сжиженный природный газ; криогенное охлаждение; холодильный транспорт; утилизация холода; автономные рефрижераторные контейнеры.

Как цитировать:

Монастырский Д.Я., Киселев И.Г. Эффективность применения утилизации холода СПГ в автономных рефрижераторных контейнерах // Инновационные транспортные системы и технологии. 2025. Т. 11, № 2. С. 246–260. doi: 10.17816/transsyst681999

Section 2. SCIENTIFIC AND PRACTICAL DEVELOPMENTS

Subject – Electrotechnical complexes and systems

© **D.Ya. Monastyrsky, I.G. Kiselev**

Emperor Alexander I St. Petersburg State Transport University
(St. Petersburg, Russia)

EFFICIENCY OF LNG COLD ENERGY RECOVERY IN STANDALONE REFRIGERATED CONTAINERS

AIM. The paper discusses the process environment of liquefied natural gas (LNG) cold energy recovery from the fuel system of a standalone refrigerated container (reefer container). To evaluate the efficiency of LNG cold energy utilization.

MATERIALS AND METHODS. The authors determined the refrigeration potential of the LNG regasification process and a developed a thermal design of the refrigeration plant.

RESULTS. The paper describes a cascade refrigeration plant with LNG and carbon dioxide circuits. The authors assess the expected effect of cold energy utilization during LNG regasification in the refrigeration system of a refrigerator.

CONCLUSION. The results allow to assess the efficiency of LNG refrigeration potential utilization in refrigerator vehicles.

Keywords: standalone power plants; liquefied natural gas; cryogenic cooling; refrigerator vehicles; cold energy utilization; standalone refrigerated containers.

To cite this paper:

Monastyrsky DYa, Kiselev IG. Efficiency of LNG Cold Energy Recovery in Standalone Refrigerated Containers. *Modern Transportation Systems and Technologies*. 2025;11(2):246–260. doi: 10.17816/transsyst681999

ВВЕДЕНИЕ

В условиях роста объема грузовых железнодорожных перевозок и дефицита вагонного парка, для перевозки термолабильных грузов применяются рефрижераторные контейнеры (рефконтейнеры) со встроенной холодильной установкой [1–4]. С целью ускорения перевозок, широкое распространение получили автономные рефконтейнеры с навесным дизельным генератором и топливным баком. Энергетическая автономность рефконтейнера позволяет избежать формирования рефрижераторных цепов и обеспечивает сохранность груза при мультимодальных перевозках в ряде транспортных ситуаций, включая возможные простои из-за очередей в транспортных узлах или других нештатных логистических ситуациях.

Применение дизельных генераторов снижает привлекательность автономных рефрижераторных контейнеров из-за чувствительности топлива к низким температурам и негативного воздействия на окружающую среду, а также в контексте стабильного роста цен на дизельное топливо [5–6]. Напротив, низкие цены на природный газ привели к росту популярности сжиженного природного газа (СПГ) среди мировых логистических компаний. Мировая практика показывает, что экономическая целесообразность перехода с дизельного топлива на СПГ достигается, если стоимость сжиженного природного газа на 20% ниже стоимости дизельного топлива, независимо от затрат на техническое переоснащение [7]. По состоянию на конец 2024 года в Российской Федерации розничная цена СПГ составила около 20,0 руб./л, в то время как средняя розничная цена дизельного топлива достигла 68,0 руб./л, что обеспечивает экономическую целесообразность перехода с дизельного топлива на СПГ.

Эффективность энергетической установки СПГ дополнительно возрастет при условии утилизации низкопотенциальной энергии СПГ. Известные способы применения СПГ для охлаждения холодильных камер предполагают полное замещение рефрижераторных установок на традиционных фреонах, что приводит к нарушению принципов непрерывной холодильной цепи, исключает автономность рефрижератора и сужает диапазон доступных для перевозки грузов из-за трудностей с регулировкой температурного режима [8–12]. В данной работе описана комбинированная система холодоснабжения с оценкой ее эффективности.

СТРУКТУРА РЕФРИЖЕРАТОРНОГО КОНТЕЙНЕРА С УТИЛИЗАЦИЕЙ ХОЛОДА СПГ

В основе утилизации холода СПГ для охлаждения груза в рефрижераторном контейнере лежит возможность отбора сжиженного газа из топливного контура. Регазификация СПГ осуществляется в спиральновитом теплообменном аппарате, предназначенном для эксплуатации в диапазоне криогенных температур.

В зависимости от состава СПГ, для полной регазификации перед подачей в газовый генератор потребуется до 925 кДж/кг [13]. Доступная для утилизации эксергия $e_{\text{спг}}$, Дж/кг, принята без учета механической эксергии из-за относительно небольшой разницы между начальным и конечным давлением СПГ, и определяется как изменение тепловой энергии с учетом необратимых потерь:

$$e_{\text{спг}} = h(T, p) - h_0(T_0, p_0) - T_0 [s(T, p) - s_0(T_0, p_0)] \quad (1)$$

Тепловая производительность теплообменного аппарата описывается с помощью уравнения теплового баланса [14, С. 65] с учетом мощности теплового потока, площади рабочей поверхности, температурного напора и характера течения рабочего тела:

$$Q_{\text{спг}} = G_{\text{спг}} \cdot (h_{\text{вых}} - h_{\text{вх}}) \quad (2)$$

$$h_{\text{вых}} = h_{\text{вх}} + L + c_p^r (T_r - T_{\text{нас}}) + \frac{R \cdot T_r}{I} \ln\left(\frac{P_{\text{спг}}}{P_{\text{газ}}}\right) \quad (3)$$

$$h_{\text{вх}} = c_p^{\text{ж}} (T_{\text{спг}} - T_{\text{газ}}) \quad (4)$$

где $Q_{\text{спг}}$ – производительность теплообменного аппарата, Вт; $G_{\text{спг}}$ – массовый расход СПГ, кг/с; $h_{\text{вх}}$ – энтальпия на выходе из теплообменника, Дж/кг; $h_{\text{вых}}$ – энтальпия на входе в теплообменник, Дж/кг; L – скрытая теплота испарения СПГ, Дж/кг; T_r – температура газа после регазификации, К; $T_{\text{нас}}$ – температура насыщения, К; $c_{\text{гр}}$ – удельная теплоёмкость газа, Дж/(кг·К); $P_{\text{газ}}$ – давление газа на выходе, Па; $P_{\text{спг}}$ – давление жидкости на входе, Па; M – молярная масса газа, кг/моль; $c_p^{\text{ж}}$ – удельная теплоёмкость СПГ, Дж/(кг·К); R – универсальная газовая постоянная; $T_{\text{спг}}$ – температура хранения СПГ, К; $T_{\text{реф}}$ – референтная точка, К.

Рефрижераторная установка 40-футового рефконтейнера, в большинстве случаев, рассчитана на температурный диапазон

от -25°C до $+30^{\circ}\text{C}$ и обеспечивает холодопроизводительность до 5,0 кВт в зимний период и до 4,0 кВт в летний период, в качестве рабочего тела применяется фреон R-404a (реже R-134) [15]. Типовое устройство автономного рефрижераторного контейнера приведено на Рис. 1.

Для полного замещения фреонового контура 40-футового рефконтейнера, необходим постоянный расход СПГ не менее 9,7 кг/ч. Требуемый расход сопоставим с потреблением СПГ двигателем крупнотоннажного автомобильного транспорта. Расход топлива на газовый генератор рефрижераторного контейнера значительно ниже: максимальная мощность навесной энергоустановки не превышает 24,0 кВт, а усредненный расход СПГ при замещении дизельного топлива составит до 4,5 кг/ч. Расчетная холодопроизводительность при указанном расходе составит от 1,06 до 1,64 кВт.

Требуемый фактический запас дизельного топлива на рейс G_d , кг:

$$G_d = 1,1g \left[\tau_b + \nu_{x1}(\tau_r - \tau_b) + \nu_{x2}(\tau_{об} - \tau_r) \right] \quad (5)$$

где 1,1 – коэффициент, учитывающий разогрев дизеля перед запуском; g – удельный расход дизельного топлива; τ_b – продолжительность первоначального охлаждения (нагрева) воздуха в рабочем пространстве рефрижераторного контейнера; τ_r – продолжительность охлаждения груза;

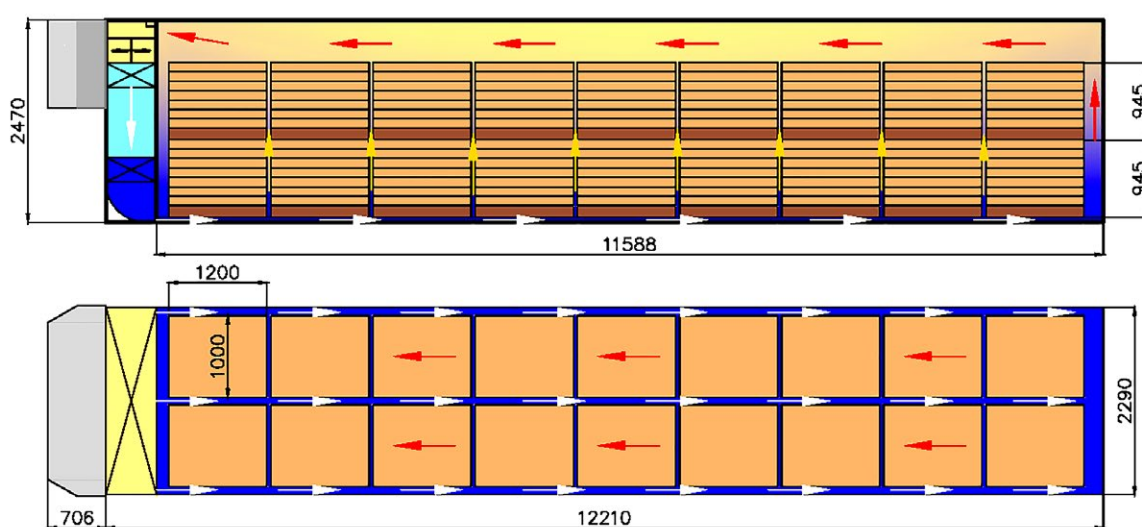


Рис. 1. Типовое устройство автономного рефрижераторного контейнера

Fig. 1. Typical design of an autonomous refrigerated container

$\tau_{об}$ – полное время рейса; $\nu_{x1(x2)}$ – коэффициент работы холодильного оборудования, определяемый как:

$$\nu_{x1(2)} = \frac{Q_{об}}{\left(1 - \frac{\Delta t_k}{\Delta t_m}\right) Q_x} \leq 1 \quad (6)$$

где $Q_{об}$ – мощность оборудования, Вт; Δt_k – расчётный тепловой напор через ограждающие конструкции рефконтейнера; Δt_m – максимальный температурный напор через ограждающие конструкции рефконтейнера, при котором прекращается полезная работа холодильных машин; Q_x – паспортная мощность холодильных машин.

Тогда требуемый фактический запас топлива на рейс $G_{спг}$, кг, и холодильный эксергетический потенциал $E_{спг}$, Дж:

$$G_{спг} = 1,79 G_d \quad (7)$$

$$E_{спг} = G_{спг} \cdot e_{спг} \quad (8)$$

где 1,79 – теоретический коэффициент перевода запаса дизельного топлива в СПГ, принятый как соотношения значений удельной теплоты сгорания СПГ и дизельного топлива с усредненными значениями плотности [16].

Наибольшая эффективность утилизации холода СПГ достигает в случае, если СПГ используется как единственное рабочее тело в цикле охлаждения [17]. Однако, из-за снижения теплопроводности металлов при низких температурах [18] и высокого температурного напора, обусловленного значительной разницей между температурой среды и СПГ, а также в целях повышения энергоэффективности процесса, для утилизации холода от СПГ в рабочем пространстве рефрижераторного контейнера предусмотрена установка дополнительной каскадной системы с диоксидом углерода (R744) в качестве рабочего тела (Рис. 2).

В первом контуре системы производится регазификация СПГ и нагрев топлива от -162°C до 5°C за счет тепловых притоков в спиральновитом теплообменном аппарате. Далее газ собирается в газовый коллектор, затем подается в топливную линию газового генератора. Второй контур нагревает СПГ за счет отвода теплоты от конденсатора диоксида углерода. Для контроля подачи СПГ в систему заложен трехходовой регулирующий клапан. С целью исключения процесса дросселирования

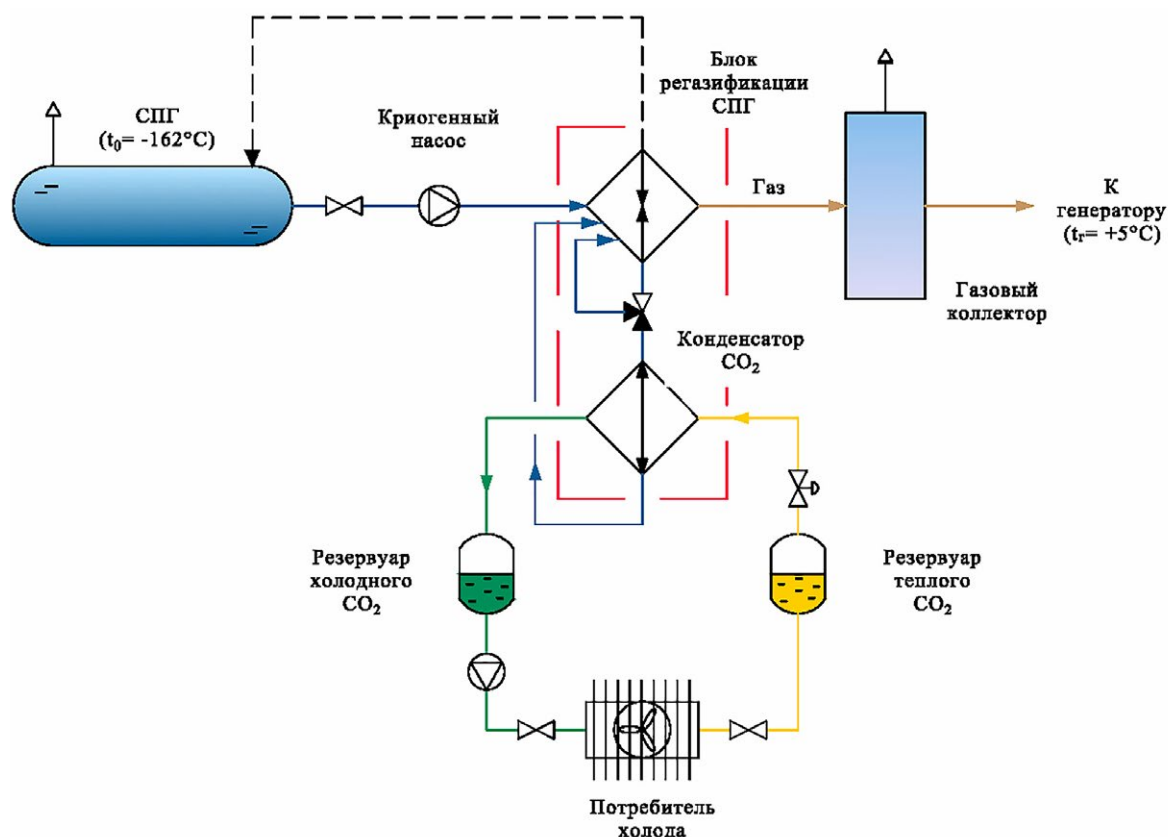


Рис. 2. Каскадная холодильная система для утилизации холода от СПГ

Fig. 2. Cascade refrigeration system for LNG cold energy utilization

жидкой фазы в регулирующем клапане, предполагается отбор СПГ температурой не ниже $-120\text{ }^{\circ}\text{C}$.

Требуемая холодильная нагрузка $Q_{\text{хол}}$ основной установки с фреоном должна компенсировать поступления теплоты $Q_{\text{общ}}$ в холодильную камеру контейнера [19]:

$$Q_{\text{хол}} = Q_{\text{общ}} = Q_{\text{н}} + Q_{\text{п}} + Q_{\text{р}} \quad (9)$$

где $Q_{\text{н}}$, $Q_{\text{п}}$, $Q_{\text{р}}$ – непрерывные, периодические и разовые теплопритоки в контейнер, соответственно, Вт.

$$Q_{\text{н}} = Q_1 + Q_2 + Q_3 + Q_4 + Q_5 \quad (10)$$

$$Q_{\text{п}} = Q_5 + Q_6 + Q_7 + Q_8 \quad (11)$$

$$Q_{\text{р}} = Q_9 + Q_{10} \quad (12)$$

где Q_1 – теплоприток через ограждающие поверхности контейнера; Q_2 – приток наружного воздуха через неплотности; Q_3 – теплоприток, учитываемый в случае необходимости охлаждения груза в процессе перевозки; Q_4 – теплоприток от физиолого-биохимических процессов в плодоовощах; Q_5 – теплоприток из-за нагрева кузова от солнечной радиации; Q_6 – теплоприток от приточного свежего воздуха; Q_7 – теплоприток от электрооборудования; Q_8 – теплопоступление от испарителя при удалении снеговой шубы. Q_9 – теплоприток в случае открытия створок контейнера; Q_{10} – теплоприток при предварительном охлаждении контейнера.

При нормальных условиях эксплуатации, подобранная в соответствии с нормативными требованиями холодильная установка рефрижераторного контейнера компенсирует все указанные теплопоступления в объем холодильной камеры. Тем не менее, контейнерные перевозки широко используются в глобальных перевозках: смена транспорта и климатических поясов приводят к эксплуатации рефконтейнера в экстремальных условиях.

Тогда каскадная система охлаждения СПГ-СО₂, размещенная в фальшпотолке контейнера, позволит добиться компенсации поступлений теплоты от наиболее нагруженных поверхностей вследствие воздействия солнечной радиации, от биохимических тепловыделений плодоовощей и позволит значительно ускорить подготовку рабочего объема рефконтейнера перед загрузкой продуктов и ускорить охлаждение груза, если таковое требуется.

ОЦЕНКА ЭФФЕКТИВНОСТИ ВНЕДРЕНИЯ УТИЛИЗАЦИИ ХОЛОДА СПГ

Для оценки эффективности описанной каскадной системы охлаждения на основе утилизации холода от СПГ необходимо оценить работу встроенной холодильной установки рефконтейнера в контексте скорости подготовки рефконтейнера к загрузке и охлаждения груза в процессе ожидания отправки и/или транспортировки.

Связь мощности холодильных установок и скорости охлаждения груза в рабочем объеме рефконтейнера принимается в виде

$$\frac{dT}{dt} = \frac{Q_{\text{реф}}}{G_{\text{гр}} \cdot C_{\text{гр}} + G_{\text{т}} \cdot C_{\text{т}}} \cdot k_{\text{т}} \quad (13)$$

где $Q_{\text{реф}}$ – полная холодильная мощность рефконтейнера, Вт; $G_{\text{гр}}$, $G_{\text{т}}$ – масса груза и тары соответственно, кг; $c_{\text{гр}}$, $c_{\text{т}}$ – удельная теплоемкость груза и тары соответственно; $k_{\text{т}}$ – коэффициент, характеризующий отношение реального потока теплоты от груза к максимальному тепловому потоку при отсутствии термического сопротивления груза:

$$k_{\text{т}} = \frac{\lambda \cdot F}{\lambda \cdot F + b_{\text{г}} \cdot Q_{\text{уст}}} \quad (14)$$

где λ – теплопроводность груза, Вт/(м·К); F – площадь поверхности теплообмена, м²; $b_{\text{г}}$ – толщина слоя груза, м. Чем ниже теплопроводность, тем меньше эффект от увеличения мощности холодильной системы рефрижератора.

Для иллюстрации эффекта произведен расчет охлаждения рефконтейнера для перевозки красных помидоров. Параметры окружающей среды приняты для зимнего, переходного и летнего периодов г. Новороссийка, принятые в расчете параметры приведены в Табл. 1:

Паспортная холодильная мощность стандартного рефконтейнера принимается 3800 ккал/ч (4,42 кВт). Результаты сравнения эффективности охлаждения системой без СПГ и с СПГ приведены в Табл. 2.

Таблица 1. Условия перевозки красных помидоров

Table 1. Transportation conditions for red tomatoes

Категория	Параметр	Зимний период	Переходный период	Летний период
Условия	Температура среды	+7 °С	+15 °С	+30 °С
	Температура груза	+10 °С	+13 °С	+20 °С
Контейнер	Тип	40-футовый рефконтейнер		
	Загрузка	0,9 от максимальной		
	Рабочая температура	до -18 °С		
Груз	Наименование	Помидор красный		
	Масса объекта	0,02 кг		
	Целевая температура	+8 ...+1 °С		
Тара	Тип	Перфорированные ящики		
	Размеры	600×400×200 мм		
	Скважность	30 %		

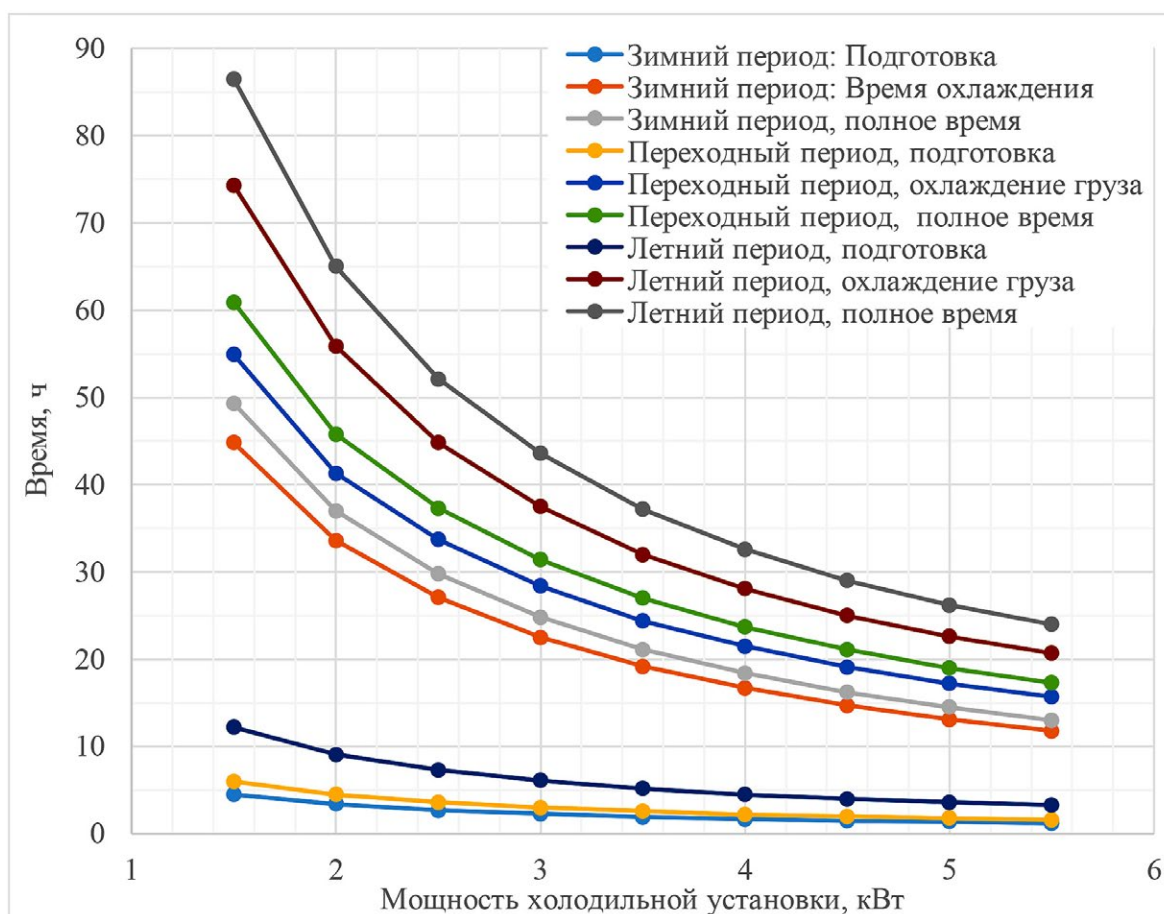


Рис. 3. Зависимость времени охлаждения пустого и загруженного рефконтейнера по сезонам (красные помидоры)

Fig. 3. Cooling time dependence of empty and loaded refrigerated containers by season (red tomatoes)

Таблица 2. Влияние утилизации холода СПГ на время подготовки и охлаждения груза
Table 2. Effect of LNG cold energy utilization on cargo preparation and cooling time

Период	Полное расчетное время	Доп. мощность СПГ	Итоговое время	Сокращение времени
Зимний	43 ч 48 мин	1,06 кВт	35 ч 24 мин	-19,18%
		1,64 кВт	32 ч 00 мин	-26,95%
Переходный	52 ч 30 мин	1,06 кВт	42 ч 24 мин	-19,24%
		1,64 кВт	38 ч 30 мин	-26,67%
Летний	68 ч 54 мин	1,06 кВт	55 ч 24 мин	-19,62%
		1,64 кВт	50 ч 18 мин	-26,98%

Результаты расчета подтверждают, что использование системы утилизации холода СПГ позволяет значительно сократить время, необходимое для охлаждения рабочего пространства рефконтейнера и перевозимого груза. Наибольший эффект наблюдается в летний период, обеспечивая сокращение подготовки рефконтейнера и охлаждения перевозимого груза до 27% в зависимости от холодопроизводительности системы.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В статье рассмотрен способ утилизации низкопотенциальной энергии сжиженного природного газа для охлаждения автономного рефрижераторного контейнера и дана оценка его эффективности.

В соответствии с международным опытом [7], при условии разницы в розничной цене на СПГ и дизельное топливо не менее 20%, применение СПГ сохраняет экономическую целесообразность; окупаемость достигается в срок до 1,5 лет при учете сохранения правительственных мер по защите климата.

- Разработана и приведена функциональная схема каскадной холодильной установки с отводом холода СПГ в контур с диоксидом углерода.
- Расчетное уменьшение полного времени охлаждения внутреннего объема рефконтейнера и груза составляет до 27% в летний период.
- Ожидаемый результат внедрения утилизации холода заключается в значительном снижении времени на подготовку рабочего пространства рефконтейнера и охлаждении груза, что обеспечит меньшую загрузку транспортных узлов.
- В случае задержки транспортировки груза, утилизация холода от СПГ позволит снизить нагрузку на основную установку и улучшить контроль за температурным режимом в различных климатических условиях, обеспечивая сохранность грузов при длительных перевозках.

Исходя из вышеизложенного, эффективности предлагаемых мер по утилизации низкопотенциальной энергии СПГ для повышения холодильной мощности автономных рефрижераторных контейнеров достаточно для осуществления мероприятий, связанных с внедрением утилизации. Результаты исследования предназначены для внедрения в транспортные системы, что окажет положительное влияние на развитие экологически чистой и экономически эффективной логистики.

Авторы заявляют что:

1. У них нет конфликта интересов;
2. Настоящая статья не содержит каких-либо исследований с участием людей в качестве объектов исследований.

The authors state that:

1. They have no conflict of interest;
2. This article does not contain any studies involving human subjects.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Покровская О.Д. Развитие логистической транспортной системы России в условиях санкций // Бюллетень результатов научных исследований. 2023. Вып. 3. С. 58-72. EDN: QTHKZC doi: 10.20295/2223-9987-2023-3-58-72
2. Зоидов К.Х., Медков А.А., Зоидов З.К. Проблемы и перспективы меридиональной трансформации транспортно-транзитной системы России с использованием традиционных маршрутов международного транспортного коридора «Север–Юг» // Региональные проблемы преобразования экономики. 2023. № 12. С. 125-142. EDN: BLTQYL doi: 10.26726/1812-7096-2023-12-125-142
3. Ван Х., Коровяковский Е.К. Состояние и анализ развития железнодорожных рефрижераторных контейнеров // Научный аспект. 2023. Т. 27, № 11. С. 3373-3380. EDN PIKXDO
4. Момот В. Перевозки СПГ на дальние и средние расстояния: проблемы и решения // Рыбная сфера. 2016. № 1(15). С. 26-27. EDN: YZLOBT
5. Li D.C., Yang H.L., Xing Y.W. Economic and emission assessment of LNG-fuelled ships for inland waterway transportation // Ocean & Coastal Management. 2023. Vol. 246. doi: 10.1016/j.ocecoaman.2023.106906
6. Hoffelner M., Kopeinig J., Schieler P. The future of freight: Evaluating the environmental and economic benefits of diesel, LNG, and electric trucks in multimodal transport // Research in Transportation Business & Management. 2025. Т. 59. doi: 10.1016/j.rtbm.2025.101319
7. LNG-fuelled trucking accelerates in Asia, denting diesel demand. Дата обращения: 06.05.2025. Режим доступа: <https://www.reuters.com/business/energy/lng-fuelled-trucking-accelerates-asia-denting-diesel-demand-2024-10-23/>
8. Tan H.; Li Y.; Tuo H. Theoretical and Experimental Study on a Self-Refrigerating System for LNG-Fueled Refrigerated Vehicles // J. Nat. Gas Sci. Eng. 2014. Vol. 20. P. 192-199. doi: 10.1016/j.jngse.2014.06.022
9. Jeong S.J., Park S.S., Min H.K., Jo G.Y. A Study of Development of Refrigerated Truck Small Scale Cooling System and Key-Part using Natural Refrigerants // Journal of the Korean Institute of Gas. 2019. Vol. 23, N. 1. P. 19-26. doi: 10.7842/kigas.2019.23.1.19
10. Wang F., Li M., Zhang Y., et al. Study on Roof-Mounted Radiant Cooling System for LNG-Fueled Refrigerated Vehicles // Int. J. Low-Carbon Technol. 2021. Vol. 16. P. 268-274. doi: 10.1093/ijlct/ctaa062

11. Saeed M.Z., Hafner A., Gabriell C., et al. CO₂ refrigeration system design and optimization for LNG driven cruise ships. In: 9th Conference on Ammonia and CO₂ Refrigeration Technologies Ohrid, R. Macedonia September 16-17, 2021 Proceedings. IIR, 2021. doi: 10.18462/iir.nh3-co2.2021.0015
12. Korlak P., Złoczowska E., Behrendt C. Utilization of waste heat and cold on the example of an LNG-fueled ultra-large container ship // *Energy Reports*. 2024. Vol. 12. P. 3488-3503. doi: 10.1016/j.egy.2024.09.026
13. Киселев И.Г., Комиссаров С.Б., Монастырский Д.Я. Оптимизация перевозок термочувствительных грузов в рефрижераторных контейнерах с применением альтернативных источников энергии // *Известия Петербургского университета путей сообщения*. 2024. Т. 21, № 1. С. 229-237. doi: 10.20295/1815-588X-2024-01-229-237
14. Данилова Г.Н., Богданов С.Н., Иванов О.П. и др. Теплообменные аппараты холодильных установок. Л.: Машиностроение, 1986.
15. Доссат Р.Д., Хоран Т.Дж. Основы холодильной техники. Москва: Техносфера, 2008.
16. Ворон О.А. Использование сжиженного природного газа в комбинированной энергосиловой установке автономного рефрижераторного вагона // *Вестник Научно-исследовательского института железнодорожного транспорта (ВЕСТНИК ВНИИЖТ)*. 2019. № 3 (78). С. 188-192. doi: 10.21780/2223-9731-2019-78-3-188-192
17. Благин Е.В., Паньшин Р.А., Угланов Д.А. Сравнительный анализ различных установок, использующих низкопотенциальное тепло сжиженного природного газа. В кн.: Проблемы и перспективы развития двигателестроения: Материалы докладов Международной научно-технической конференции, Самара, 12–14 сентября 2018 года. Самара: Самарский национальный исследовательский университет имени академика С.П. Королева, 2018. С. 121-122. EDN YQTHWN
18. Заварицкий Н.В., Зельдович А.Г. Теплопроводность технических материалов при низких температурах // *Журнал технической физики*. 1956. Т. 26, №. 9. С. 2032-2036.
19. Ефимов В.В., Кобозева Н.Г., Конограй О.А., Слободчиков Н.А. Железнодорожный хладотранспорт и доставка скоропортящихся грузов: учебник. Екатеринбург: УМЦ ЖДТ, 2022.

REFERENCES

1. Pokrovskaya OD. Development of Russia's Logistics Transport System Under Sanctions. *Bulletin of scientific research results*. 2023;(3):58-72. (In Russ.) EDN: QTHKZC doi: 10.20295/2223-9987-2023-3-58-72
2. Zoidov KKh, Medkov AA, Zoidov ZK. Problems and prospects of meridional transformation the transport and transit system of Russia using traditional international transport routes the North–South corridor. *Regionalnye problemy preobrazovaniya ekonomiki*. 2023;12:125-142. doi: 10.26726/1812-7096-2023-12-125-142

3. Van Kh, Korovyakovskii EK. *Sostoyanie i analiz razvitiya zheleznodorozhnykh refrizheratornykh konteynerov. Nauchnyi aspekt.* 2023;27(11):3373-3380. (In Russ.) EDN: PIKXDO
4. Momot V. LNG transportation over long and medium distances: problems and solutions. *Fish sphere.* 2016;(1):26-27. EDN: YZLOBT (In Russ.)
5. Li DC, Yang HL, Xing YW. Economic and emission assessment of LNG-fuelled ships for inland waterway transportation. *Ocean & Coastal Management.* 2023;(246). doi: 10.1016/j.ocecoaman.2023.106906
6. Hoffelner M, Kopeinig J, Schieler P. The future of freight: Evaluating the environmental and economic benefits of diesel, LNG, and electric trucks in multimodal transport. *Research in Transportation Business & Management.* 2025;(59). doi: 10.1016/j.rtbm.2025.101319
7. LNG-fuelled trucking accelerates in Asia, denting diesel demand. Accessed: 06.05.2025. Available from: <https://www.reuters.com/business/energy/lng-fuelled-trucking-accelerates-asia-denting-diesel-demand-2024-10-23>
8. Tan H, Li Y, Tuo H. Theoretical and Experimental Study on a Self-Refrigerating System for LNG-Fueled Refrigerated Vehicles. *J. Nat. Gas Sci. Eng.* 2014;(20):192-199. doi: 10.1016/j.jngse.2014.06.022
9. Jeong, SJ, Park SS, Min HK, Jo GY. A Study of Development of Refrigerated Truck Small Scale Cooling System and Key-Part using Natural Refrigerants. *Journal of the Korean Institute of Gas.* 2019;(23):19-26. doi: 10.7842/kigas.2019.23.1.19
10. Wang F, Li M, Zhang Y, et al. Study on Roof-Mounted Radiant Cooling System for LNG-Fueled Refrigerated Vehicles. *Int. J. Low-Carbon Technol.* 2021;(16):268-274. doi: 10.1093/ijlct/ctaa062
11. Saeed MZ, Hafner A, Gabrielii C, et al. CO2 refrigeration system design and optimization for LNG driven cruise ships. In: *Proceedings of the 9th Conference on Ammonia and CO2 Refrigeration Technologies Ohrid, R. 2021 Sept 16-17.* Macedonia: IIR; 2021. doi: 10.18462/iir.nh3-co2.2021.0015
12. Korlak P, Złoczowska E, Behrendt C. Utilization of waste heat and cold on the example of an LNG-fueled ultra-large container ship. *Energy Reports.* 2024;(12):3488-3503. doi: 10.1016/j.egyr.2024.09.026
13. Kiselev IG, Komissarov SB, Monastyrsky DYa. Alternative energy sources for transporting thermosensitive goods in autonomous refrigerated containers. *Proceedings of Petersburg Transport University.* 2024;(21):229-237. doi: 10.20295/1815-588X-2024-01-229-237
14. Danilova GN, Bogdanov SN, Ivanov OP, et al. *Teploobmennye apparaty kholodilnykh ustanovok.* Leningrad: Mashinostroenie; 1986. (In Russ.)
15. Dossat RJ. *Principles of Refrigeration.* New York and London: John Wiley & Sons Inc.; 1961.
16. Voron OA. The use of liquefied natural gas in the combined power unit of autonomous refrigerated car. *Vestnik of the Railway Research Institute.* 2019;(1):29-32. doi: 10.21780/2223-9731-2019-78-3-188-192
17. Blagin EV, Panshin RA, Uglov DA. Comparative analysis of different plants utilizing cold energy of liquid natural gas. In: *Proceedings of the International Scientific*

- and Practical Conference: "Problemy i perspektivy razvitiya dvigatelestroeniya"; 2018 Sept 12–14, Samara, RU. Samara National Research University; 2018:121-122. EDN: YQTHWH*
18. Zavaritskii NV, Zel'dovich AG. Teploprovodnost' tekhnicheskikh materialov pri nizkikh temperaturakh. *Journal of Technical Physics*. 1956;(26):2032-2036. (In Russ.)
 19. Efimov VV, Kobozeva NG., Kongorai OA, Slobodchikov NA. Zheleznodorozhnyi khladotransport i dostavka skoroportyashchikhsya грузов. Yekaterinburg: UMTS ZhDT; 2022. (In Russ.)

Сведения об авторах:

Монастырский Дмитрий Ярославович, аспирант;

eLibrary SPIN: 1010-3575; ORCID: 0009-0009-3528-8490;

E-mail: swen_88@mail.ru

Киселев Игорь Георгиевич, доктор технических наук, профессор;

eLibrary SPIN: 7398-3334; ORCID: 0000-0002-0862-9669;

E-mail: tatkiselev4.igor@yandex.ru

Information about the authors:

Dmitry Ya. Monastyrsky, post-graduate student;

eLibrary SPIN: 1010-3575; ORCID: 0009-0009-3528-8490;

E-mail: swen_88@mail.ru

Igor G. Kiselev, Dr. Sci. (Engineering), professor;

eLibrary SPIN: 7398-3334; ORCID: 0000-0002-0862-9669;

E-mail: tatkiselev4.igor@yandex.ru