

# Использование сжиженного природного газа в комбинированной энергосиловой установке автономного рефрижераторного вагона

О. А. ВОРОН

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Ростовский государственный университет путей сообщения» (ФГБОУ ВО РГУПС), Ростов-на-Дону, 344038, Россия

**Аннотация.** Рассмотрена комбинированная система энергоснабжения автономного рефрижераторного вагона, включающая в себя дизель-генераторную установку и подвагонный генератор. Оценены возможности использования сжиженного природного газа в качестве моторного топлива для дизель-генераторной установки, а также генераторно-приводных установок с подвагонным генератором. С учетом опыта эксплуатации энергосиловых установок вагонов в режиме безлюдных технологий представлены преимущества от использования сжиженного природного газа в качестве моторного топлива. Приведен сравнительный расчет расходов различных видов топлива энергосиловой установкой автономного рефрижераторного вагона. Обоснованы преимущества использования утилизации теплоты парообразования сжиженного природного газа для повышения охлаждающей способности штатной холодильной установки. Дана сравнительная расчетная экономическая оценка расходов на топливо при различных вариантах систем энергоснабжения на маршрутах при движении с большой скоростью и ускоренными рефрижераторными поездами. Результаты расчетов позволяют определить необходимый бортовой запас топлива для разных вариантов систем энергоснабжения.

**Ключевые слова:** скоропортящийся груз; сжиженный природный газ; автономный рефрижераторный вагон; энергосиловая установка; холодопроизводительность; теплообменник; генераторно-приводная установка; подвагонный генератор; ускоренный рефрижераторный поезд; система автономного энергоснабжения

**Анализ существующего изотермического подвижного состава и технологий транспортировки скоропортящихся грузов на маршрутах большой протяженности.** В настоящее время перевозка скоропортящихся грузов по железным дорогам России и стран СНГ осуществляется преимущественно в 5-вагонных рефрижераторных секциях отечественной постройки, производства Германии, а также в крупнотоннажных рефрижераторных контейнерах (КРК) и вагонах-термосах. Автономные рефрижераторные вагоны (АРВ) с индивидуальным энергоснабжением не эксплуатируются и списаны уже более 20 лет назад, однако в США именно этот тип рефрижераторного подвижного состава имеет приоритет для перевозок скоропортящихся грузов.

Протяженность маршрутов для рынка перевозок скоропортящейся продукции является определяю-

щим фактором при выборе способа перевозки: при дальности перевозки 2–3 тыс. км железнодорожный транспорт проигрывает в конкурентной борьбе автомобильному, так как средняя скорость следования вагонов гораздо ниже и составляет около 400 км/сут [1, 2]. Положительное влияние на рынок оказала практика формирования ускоренных рефрижераторных поездов (УРП) с Дальневосточной железной дороги в центральную часть страны. Их скорость продвижения по маршруту составляет более 1000 км/сут. Время доставки скоропортящейся продукции из Владивостока в Санкт-Петербург обычными грузовыми поездами составляет 22 сут, ускоренными поездами — не более 16 сут. До Москвы УРП следуют за 13–14 сут вместо 21 [3]. Такие скорости движения позволяют использовать подвагонные генераторы в качестве дополнительного источника энергоснабжения вагонов. В рамках реализации новых технических решений для изотермического подвижного состава (ИПС) проводятся исследования по разработке автономных комплексов энергоснабжения на базе подвагонных генераторов. Анализ графиков движения грузовых поездов показывает возможность выработки электроэнергии в течение 30 % времени движения с большой скоростью и до 70 % — при движении в составе УРП [4].

**Традиционное исполнение энергосилового оборудования рефрижераторного подвижного состава.** В качестве основной энергосиловой установки для выработки электроэнергии ИПС применяются дизель-генераторные агрегаты (ДГА). В рефрижераторных секциях они размещены в служебно-техническом вагоне дизель-электростанции. Их мощность позволяет обеспечивать энергоснабжение четырех грузовых рефрижераторных вагонов. Бортовые запасы дизельного топлива составляют около 6 т и располагаются в топливных баках в подвагонном пространстве. При расходе топлива одним ДГА примерно 20 кг/ч бортовых запасов хватает на его работу без дозаправки в среднем на один месяц, конечно в зависимости от продолжительности груженого рейса. В АРВ модели МК-424 прежних лет выпуска общая масса оборудо-

■ E-mail: [rgups\\_voron@mail.ru](mailto:rgups_voron@mail.ru) (О. А. Ворон)

вания с полной экипировкой составляла около 6 т при обеспечении автономности работы оборудования до 10 сут в зависимости от рода груза и времени года. Для исключения промежуточной экипировки дизельным топливом в пути следования рефрижераторный вагон должен иметь бортовые запасы топлива 1,0–1,2 т. Превышение этой величины приводит к существенному снижению грузоподъемности вагона, которая уже уменьшена из-за дополнительной массы энергетического и холодильного оборудования.

**Предлагаемые технические решения.** Повысить автономность работы АРВ на протяженном маршруте без дозаправки можно при использовании комбинированной энергосиловой установки с дизель-генераторным агрегатом и подвагонным генератором.

В работе [2] предлагается для перспективного АРВ применить блочно-модульный принцип формирования энергохолодильного оборудования. Компактность и ограничения в весе установки являются важными критериями при выборе вариантов систем энергообеспечения АРВ. Размещение больших запасов топлива существенно снижает полезный объем и грузоподъемность вагонов этого типа. При этом основным источником электроэнергии является дизель-генераторная установка, а в качестве дополнительного источника электроэнергии при движении вагона со скоростью 700–1000 км/сут предполагается использовать вентильно-индукторный подвагонный генератор, установленный на тележке типа КВЗ-И2 [2].

Применение двух источников энергоснабжения позволит увеличить автономность перспективного рефрижераторного вагона, сократить расход горючесмазочных материалов (ГСМ) за счет уменьшения времени работы дизель-генератора и тем самым повысить его экономическую эффективность.

В качестве источника энергоснабжения базового вагонокомплекта может быть использован дизель-генератор, работающий на двух видах моторного топлива — дизельном или сжиженном природном газе (СПГ). Компонировочные решения такого вагона представлены на рис. 1.

**Преимущества и возможности использования СПГ в качестве моторного топлива и хладагента.** В настоящее время в качестве моторного топлива для транспорта все шире применяется СПГ (метан). С началом производства СПГ на Ямале (завод «Ямал СПГ» компании «Новатэк») появилась возможность увеличения потребления газа на внутреннем рынке для газификации удаленных населенных пунктов и использования СПГ на транспорте в качестве моторного топлива.

Сегодня весь объем производимого СПГ в России обеспечивается двумя заводами: «Сахалин-2» (запущен в эксплуатацию с 2009 г., производственная мощность — 9,6 млн т/год) и «Ямал СПГ» (первая линия мощностью 5,5 млн т введена в эксплуатацию в 2017 г.,

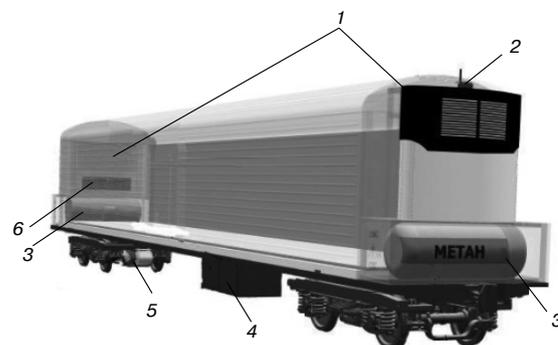


Рис. 1. Компонировка энергосилового оборудования автономного рефрижераторного вагона: 1 — холодильная установка с дизель-генераторным агрегатом; 2 — система дистанционного мониторинга; 3 — криогенная топливная система; 4 — статический преобразователь; 5 — генераторно-приводная установка; 6 — криогенный газификатор  
 Fig. 1. Layout of power equipment of an autonomous refrigerated car: 1 — refrigeration unit with diesel generator set; 2 — remote monitoring system; 3 — cryogenic fuel system; 4 — static converter; 5 — generator and drive unit; 6 — cryogenic gasifier

совокупная проектная мощность трех запущенных линий составляет 16,5 млн т/год СПГ) [5].

СПГ получают из метана путем его охлаждения до температуры конденсации  $-161,5^{\circ}\text{C}$ , температура кристаллизации составляет  $-182,5^{\circ}\text{C}$ , плотность 0,42 кг/л. Производят, хранят и транспортируют его с помощью специализированного криогенного оборудования. Главное преимущество СПГ — при сжижении объем газа уменьшается в 600 раз. На практике это означает, что в одинаковом объеме содержится СПГ в 3 раза больше, чем сжатого природного газа при давлении 20 МПа. Так, при нормальных условиях в автомобильном баллоне емкостью 50 л при давлении 20 МПа содержится 10–12 м<sup>3</sup> природного газа в газообразном состоянии, что эквивалентно 12–15 л бензина, при этом уменьшается масса тары для его хранения и перевозки [6].

На железнодорожном транспорте СПГ используют в качестве топлива для газотепловозов и газотурбовозов. Основные этапы начала использования СПГ в качестве моторного топлива представлены в работе [7]. Отметим, что исследования по использованию СПГ для локомотивов проводились в РГУПС с 1988 по 1990 г. На маневровом локомотиве ТЭМ3 была достигнута стадия экспериментальных работ на натурном образце тепловоза, а для магистрального тепловоза 2ТЭ10Г был выполнен комплекс проектных и конструкторско-технологических работ с изготовлением опытного образца.

С 2013 г. на Свердловской железной дороге эксплуатируется маневровый локомотив ТЭМ19 и два магистральных газотурбовоза ГТ1h. В качестве перспективного полигона для использования железнодорожного транспорта на СПГ ОАО «РЖД» определен участок Войновка — Новый Уренгой, протя-

женность которого составляет около 1500 км. На территориях газораспределительных станций (ГРС) городов Тобольска, Сургута и Ноябрьска выделены участки для строительства трех комплексов сжижения природного газа производительностью 3–5 т/ч, а на станциях Войновка, Тобольск, Демьянка, Сургут, Ноябрьск, Лимбей, Коротчаево — пунктов экипировки СПГ. На железнодорожной линии Обская — Бованенково запланирован перевод на СПГ парка локомотивов Ямальского филиала ООО «Газпромтранс». Для этого на ГРС Обская предусмотрено строительство комплекса сжижения проектной производительностью 1,5 т/ч, а на станциях Обская, Разъезд № 15, Карская — экипировочных пунктов. Создание инфраструктуры СПГ обеспечат «Газпром газомоторное топливо» и совместное предприятие «Газпром СПГ технологии» и ОАО «Уралкриомаш» [7, 8].

Использование СПГ в качестве топлива для автомобильного транспорта закреплено в нормативных документах [9]. Применение СПГ для энергетических установок рефрижераторных вагонов имеет следующие преимущества:

- экономия денежных средств на покупку топлива, так как цена эквивалентного количества сжиженного газа ниже, чем бензина или дизельного топлива;
- экологическая чистота;
- возможность утилизации удельной теплоты парообразования (до 10 % потребной холодопроизводительности);
- предохранение топливной системы от коррозии и загрязнений;
- невозможность хищений (его невозможно слить).

В работе [10] рассмотрены вопросы использования холода газификации СПГ для различных видов транспорта и оценены возможности применения его для транспортных систем кондиционирования. Как показывает опыт эксплуатации дизель-генераторных установок для энергоснабжения КРК, часовой расход дизельного топлива генераторной установкой при максимальной нагрузке составляет  $Q_{\text{дт}}^{\text{час}} = 4$  л/ч. Перед поступлением топлива в дизель СПГ газифицируют, т. е. испаряют, и нагревают до температуры окружающей среды. На эти процессы потребуется около 800–850 кДж/кг, в зависимости от требуемой температуры [9]. При этом для испарения СПГ в криогенном газификаторе возможно использование теплоты воздуха грузового помещения и перевозимого груза. Эта величина составляет от 0,72 кВт для индивидуальной энергоустановки рефрижераторного кон-

тейнера до 4,9 кВт для каждого ДГА вагона дизель-электростанции рефрижераторной секции. В случае использования СПГ для других типов ИПС потребуется разработка схемных решений топливной системы транспортного средства с увязкой работы его холодильной установки. Технические характеристики энергосиловой установки для энергоснабжения КРК представлены в [10].

**Расчеты расходов различных видов топлива при эксплуатации на маршрутах значительной протяженности.** Расход СПГ энергосиловой установкой определим теоретическим путем.

Массовый расход дизельного топлива рассчитаем по формуле

$$Q_{(M)ДТ}^{\text{час}} = Q_{\text{дт}}^{\text{час}} \rho_{\text{дт}},$$

где  $\rho_{\text{дт}}$  — плотность дизельного топлива, кг/л, (см. таблицу).

$$Q_{(M)ДТ}^{\text{час}} = 4 \cdot 0,860 = 3,44 \text{ кг/ч.}$$

Массовый расход СПГ определим по формуле

$$Q_{(M)СПГ}^{\text{час}} = Q_{(M)ДТ}^{\text{час}} \frac{q_{\text{дт}}}{q_{\text{СПГ}}},$$

где  $q_{\text{дт}}$  — удельная теплота сгорания дизельного топлива (см. таблицу);  $q_{\text{СПГ}}$  — удельная теплота сгорания СПГ (см. таблицу).

Массовый расход СПГ будет равен

$$Q_{(M)СПГ}^{\text{час}} = 3,44 \cdot \frac{42\,700}{48\,500} = 3,03 \text{ кг/ч.}$$

Определим расход СПГ в единицах объема:

$$Q_{\text{СПГ}}^{\text{час}} = \frac{Q_{(M)СПГ}^{\text{час}}}{\rho_{\text{СПГ}}},$$

где  $\rho_{\text{СПГ}}$  — плотность СПГ (см. таблицу).

$$Q_{\text{СПГ}}^{\text{час}} = \frac{3,03}{0,422} = 7,17 \text{ л/ч.}$$

Для количественной оценки расхода топлива в движении по маршруту примем следующие исходные данные для ориентировочных экономических расчетов.

1. Коэффициент рабочего времени холодильного оборудования в общем времени перевозки — 0,6.

2. Коэффициент рабочего времени холодильного оборудования с учетом утилизации удельной теплоты парообразования СПГ в общем времени перевозки — 0,5.

3. Коэффициент рабочего времени дизель-генераторной установки в общем времени перевозки с большой скоростью — 0,7.

4. Коэффициент рабочего времени дизель-генераторной установки в общем времени перевозки УРП — 0,3.

Расчетные данные для маршрута движения грузового поезда с большой скоростью и УРП на самом про-

Термофизические характеристики видов топлива  
Thermophysical characteristics of fuels

Вид топлива	Удельная теплота сгорания, кДж/кг	Плотность, кг/л
СПГ	48 500	0,422
Дизельное топливо	42 700	0,860

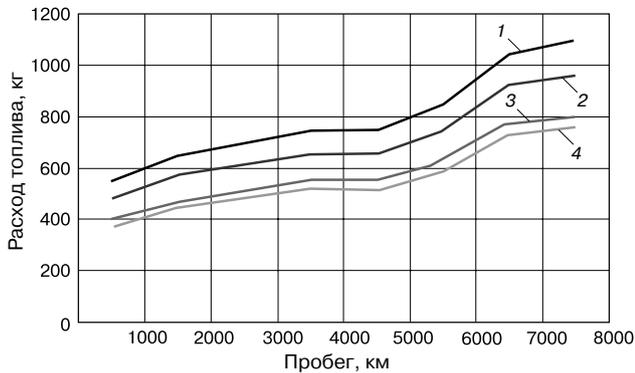


Рис. 2. Расход топлива при движении АРВ с комбинированной энергосиловой установкой в составе поезда с большой скоростью: 1 — дизтопливо; 2 — СПГ; 3 — СПГ с учетом утилизации теплоты испарения; 4 — дизтопливо с учетом работы подвагонного генератора

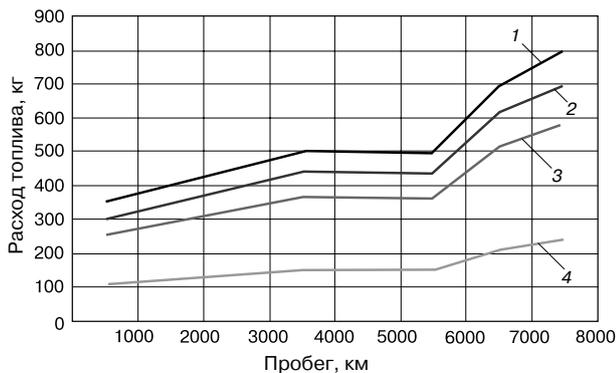


Рис. 3. Расход топлива при движении АРВ с комбинированной энергосиловой установкой в составе УРП: 1 — дизтопливо; 2 — СПГ; 3 — СПГ с учетом утилизации теплоты испарения; 4 — дизтопливо с учетом работы подвагонного генератора

тяжелом маршруте Владивосток — Москва — Санкт-Петербург, характерном для перевозок замороженной рыбы, представлены на рис. 2, 3.

**Заключительные положения.** Анализ результатов расчетов показывает необходимый бортовой запас различных видов топлива для разных вариантов исполнения системы энергоснабжения и с учетом скорости движения вагона. Эти данные могут использоваться на начальном этапе как при проектировании АРВ, так и операторскими компаниями, осуществляющими транспортную деятельность на определенных маршрутах перевозок.

Новый АРВ должен проектироваться исходя из концепции, при которой рефрижераторные вагоны состоят из унифицированных блоков, нормализованных и стандартных узлов и деталей, которые позволят

производить на основе базового вагонокомплекта изотермические вагоны разных типов [2]. Требуемая комплектация АРВ с заданными техническими параметрами должна обеспечивать потребительские качества, в максимальной степени соответствующие требованиям рынка транспортных услуг и возможностей железнодорожной инфраструктуры в части обеспечения технического обслуживания и экипировки этих вагонов. На первом этапе использования СПГ с учетом обеспечения резервного запаса топлива может быть применена криогенная топливная система БКТ-850 производства ОАО «Криомаш-БЗКМ» объемом 850 л.

**Выводы.** 1. Использование СПГ в качестве моторного топлива и дополнительного источника холода АРВ является перспективным. Автономность вагона на имеющихся запасах топлива повышается из-за сокращения времени работы холодильной и энергосиловой установок.

2. Снижение эксплуатационных затрат достигается за счет экономии денежных средств на покупку топлива, так как цена эквивалентного количества сжиженного газа ниже, чем бензина или дизельного топлива.

3. Эксплуатационными преимуществами СПГ являются предохранение топливной системы от коррозии и загрязнений, а также невозможность хищений при работе в режиме безлюдных технологий.

4. Использование генераторно-приводной установки с подвагонным генератором позволит экономить от 30 до 70 % применяемого топлива (СПГ или дизельного), в зависимости от скоростей движения грузового поезда на маршрутах значительной протяженности.

5. Для эксплуатации подобных систем целесообразно в качестве базовых полигонов рассмотреть регионы с подготовленной инфраструктурой экипировки СПГ (например, Свердловскую область), находящиеся на стабильных маршрутах перевозок скоропортящихся грузов.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Науменко С. Н., Теймуразов Н. С. Актуальные проблемы развития хладотранспорта // Железнодорожный транспорт. 2008. № 4. С. 88–91.
2. Ворон О. А., Аверков Н. К., Науменко С. Н. Концепция разработки и создания изотермических транспортных средств нового поколения // Вестник ВНИИЖТ. 2011. № 1. С. 29–32.
3. Скачков А. А., Мехедов М. И., Петров В. В. Перевозка скоропортящихся грузов по технологии «Холодный экспресс» // Железнодорожный транспорт. 2018. № 9. С. 51–54.
4. Ворон О. А., Самошкин С. Л., Семенов П. Ю. Фитинговые платформы с автономной системой электроснабжения — инновационный подвижной состав для перевозки скоропортящихся грузов // Транспорт Российской Федерации. 2015. № 2. С. 28–30.
5. «Ямал СПГ» в 2018 году обеспечил 17 % поставок сжиженного природного газа в Великобританию [Электронный ресурс]. URL: <https://ru.investing.com/news/economy-news/article-613249> (дата обращения: 26.03.2019 г.).

6. Авторефрижераторный транспорт и контейнеры: учеб. пособие / Г. А. Белозеров [и др.]. Рязань: Рязанская областная типография, 2010. 296 с.

7. Кондратенко С. Е. Перспективы применения сжиженного природного газа в качестве моторного топлива в России // Газовая промышленность. 2017. № 4. С. 76–82.

8. Черемных О. Я. Перспектива развития транспортных средств для сжиженного природного газа [Электронный ресурс] // Инженерный журнал: наука и инновации. 2018. № 1. С. 1–20. URL: <http://engjournal.ru/catalog/pmce/mdpr/1722.html> (дата обращения: 25.01.2019 г.). DOI 10.18698/2308-6033-2018-1-1722.

9. ГОСТ Р 56 217–2014. Автомобильные транспортные средства, использующие газ в качестве моторного топлива. Общие технические требования к эксплуатации на сжиженном природном газе, техника безопасности и методы испытаний. М: Стандартинформ, 2016. 20 с.

10. Карагусов В. И., Юша В. Л., Карагусов И. В. Использование холода газификации природного газа для кондиционирования на транспорте // Транспорт на альтернативном топливе. 2013. № 5. С. 66–67.

11. Возможности использования альтернативных источников топлива для систем энергоснабжения крупнотоннажных рефрижераторных контейнеров / О. А. Ворон [и др.] // Труды РГУПС. 2018. № 4. С. 36–41.

## ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРЕ

**ВОРОН Олег Андреевич,**

канд. техн. наук, доцент, заведующий кафедрой «Вагоны и вагонное хозяйство», ФГБОУ ВО РГУПС

Статья поступила в редакцию 27.03.2019 г., принята к публикации 31.05.2019 г.

## The use of liquefied natural gas in the combined power unit of autonomous refrigerated car

**O. A. VORON**

Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education "Rostov State Transport University" (FGBOU VO RGUPS), Rostov-on-Don, 344038, Russia

**Abstract.** A specific feature of the market for the transport of perishable goods is the length of the routes. As part of the implementation of new technical solutions for isothermal rolling stock, research is being conducted on the development of autonomous power supply complexes. The article discusses combined power supply system of an autonomous refrigerated car (ARC), which includes a diesel generator set and a carriage generator. Possibility of using liquefied natural gas as a motor fuel for a diesel generator set, as well as generator and drive units with a car generator is being evaluated. Taking into account the operating experience of power plants of cars in the mode of unmanned technologies, the advantages of using liquefied gas as fuel are described. Comparative calculation of the costs of various types of fuel by the ARC power plant is given. The advantages of using the utilization of the heat of vaporization of liquefied natural gas (LNG) to increase the cooling capacity of a regular refrigeration unit are substantiated. Article gives comparative calculated economic assessment of fuel costs when using different options for power supply systems on routes when driving at high speed and accelerated refrigerated trains, which allows determining the required onboard fuel supply for different options. The use of LNG as a motor fuel and an additional source of cold for ARC is promising. Autonomy of the car on existing fuel reserves is increased by reducing the operating time of refrigeration and power plants. Reducing operating costs is achieved through savings on the purchase of fuel, since the price of an equivalent amount of LNG is lower than that of gasoline or diesel fuel. Operational advantages of LNG are to protect the fuel system from corrosion and contamination. The use of a generator-drive unit with a car generator will save from 30 to 70 % of the fuel used (LNG or diesel), depending on the speed of the freight train on routes of considerable length.

**Keywords:** perishable goods; liquefied natural gas; autonomous refrigerated car; power plant; cooling capacity; heat exchanger; generator and drive installation; car generator; accelerated reefer train; autonomous power supply system

**DOI:** <http://dx.doi.org/10.21780/2223-9731-2019-78-3-188-192>

### REFERENCES

1. Naumenko S. N., Teymurazov N. S. *Actual problems of development of refrigerator transport*. Zheleznodorozhnyy transport, 2008, no. 4, pp. 88–91.

2. Voron O. A., Averkov N. K., Naumenko S. N. *Concept of development and creation of isothermal vehicles of a new generation*. Vestik of the Railway Research Institute, 2011, no. 1, pp. 29–32.

3. Skachkov A. A., Mekhedov M. I., Petrov V. V. *Transportation of perishable goods using the "Cold Express" technology*. Zheleznodorozhnyy transport, 2018, no. 9, pp. 51–54.

4. Voron O. A., Samoshkin S. L., Semenov P. Yu. *Fitting platforms with autonomous power supply system — innovative rolling stock for transportation of perishable goods*. Transport Rossiyskoy Federatsii, 2015, no. 2, pp. 28–30.

5. "Yamal SPG" in 2018 provided 17 % of supplies of liquefied natural gas to the UK. URL: <https://ru.investing.com/news/economy-news/article-613249> (retrieved on 26.03.2019) (in Russ.).

6. Belozеров G. A., Babakin B. S., Gryzunov A. A., Pomazkina N. V., Shavtra V. M. *Refrigerated transport and containers. Reference book*. Ryazan', Ryazanskaya oblastnaya tipografiya Publ., 2010, 296 p.

7. Kondratenko S. E. *Prospects for the use of liquefied natural gas as a motor fuel in Russia*. Gazovaya promyshlennost', 2017, no. 4, pp. 76–82.

8. Cheremnykh O. Y. *Prospects for the development of vehicles for liquefied natural gas*. Engineering Journal: Science and Innovation, 2018, no. 1, pp. 1–20. URL: <http://engjournal.ru/catalog/pmce/mdpr/1722.html> (retrieved on 25.01.2019) (in Russ.).

9. ГОСТ R 56 217–2014. *Automobile vehicles using gas as a motor fuel. General technical requirements for operation on liquefied natural gas, safety engineering and test methods*. Moscow, Standartinform Publ., 2016, 20 p. (in Russ.).

10. Karagusov V. I., Yusha V. L., Karagusov I. V. *Use of cold gasification of natural gas for transport conditioning*. Transport na al'ternativnom toplive, 2013, no. 5, pp. 66–67.

11. Voron O. A. Possibilities of using alternative sources of fuel for power supply systems of large-capacity refrigerated containers. Proc. of RGUPS, 2018, no. 4, pp. 36–41.

### ABOUT THE AUTHOR

**Oleg A. VORON,**

Cand. Sci. (Eng.), Associate Professor, Head of the Department "Cars and car facility", FGBOU VO RGUPS

Received 27.03.2019

Accepted 31.05.2019

■ E-mail: [rgups\\_voron@mail.ru](mailto:rgups_voron@mail.ru) (O. A. Voron)