

ОПЫТ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ СЖИЖЕННОГО ПРИРОДНОГО ГАЗА КАК ГАЗОМОТОРНОГО ТОПЛИВА НА ТЕХНОЛОГИЧЕСКОМ ТРАНСПОРТЕ

Г. М. Дубов[✉], М. Ю. Яцевич, Д. А. Бороненков, Д. М. Якобсон

ФГБОУ ВО «Кузбасский государственный технический университет имени Т. Ф. Горбачева»,

г. Кемерово, Российская Федерация

✉ dubovgm@kuzstu.ru

Аннотация: Проведен анализ мирового опыта и преимуществ применения сжиженного природного газа (СПГ) как моторного топлива для технологического транспорта. Дается сравнительный анализ СПГ по отношению к нефтяным видам моторных топлив. Рассматриваются ключевые аспекты применения СПГ, включая его экологическую, техногенную и экономическую выгоду по сравнению с традиционными видами моторных топлив. Представлен мировой опыт использования СПГ в разных странах, где этот вид топлива получил значительное распространение. Рассмотрены ключевые особенности и пример транспортно-заправочной инфраструктуры СПГ на участках горных выработок. Особое внимание уделено российскому опыту и проблемам, связанным с развитием инфраструктуры для применения СПГ как газомоторного топлива. Приводятся примеры успешно реализованных в России проектов по использованию СПГ как газомоторного топлива на технологическом транспорте, в частности на карьерной технике.

Ключевые слова: сжиженный природный газ, газомоторное топливо, технологический транспорт, экологические и техногенные преимущества, экономическая эффективность

Для цитирования: Дубов ГМ, Яцевич МЮ, Бороненков ДА и др. Опыт использования сжиженного природного газа как газомоторного топлива на технологическом транспорте. *Маркшейдерия и недропользование*. 2025;25(3):73-81. <https://doi.org/10.56195/20793332-2025-25-3-73-81>.

EXPERIENCE IN THE USE OF LIQUEFIED NATURAL GAS AS A GAS MOTOR FUEL IN TECHNOLOGICAL TRANSPORT

G. M. Dubov[✉], M. Y. Yatsevich, D. A. Boronenkov, D. M. Yakobson

T. F. Gorbachev Kuzbass State Technical University, Kemerovo, Russian Federation

✉ dubovgm@kuzstu.ru

Abstract: The article analyzes the prospects for using liquefied natural gas (LNG) as a motor fuel in industrial transport. Key aspects of LNG application are considered, including its environmental, technogenic and economic benefits compared to traditional fuels. International experience of using LNG in different countries, such as China, India, Iran, Egypt, Brazil and others, where this type of fuel has become widespread, is described. The key features and an example of LNG transportation and refueling infrastructure at mining sites are considered. Particular attention is paid to Russian experience and problems associated with the development of LNG infrastructure.

Keywords: liquefied natural gas (LNG), gas motor fuel, technological transport, gas motor fuel, environmental and man-made advantages, economic efficiency

For citation: Dubov GM, Yatsevich MY, Boronenkov DA, et al. Experience in the use of liquefied natural gas as a gas motor fuel in technological transport. *Mine Surveying and Subsurface Use*. 2025;25(3):73-81. (In Russ.). <https://doi.org/10.56195/20793332-2025-25-3-73-81>.

Введение

В настоящее время транспортная сфера активно ищет альтернативные источники энергии для повышения производительности и снижения воздействия на окружающую среду. Это связано еще и с тем, что запасы сырья для традиционных видов топлива, таких как нефть, постепенно истощаются, и необходимо искать им замену.

В последние годы в транспортной сфере все более явно прослеживается тенденция к использованию различных типов топлива. Сложность заключается в том, что пока нет однозначного решения о полной замене дизельного топлива и бензина каким-то другим видом топлива. Необходимо отметить, что даже электромобили и автомобили на водородном топливе функционируют не только на возобновляемых источниках, их работоспособность во многом зависит от классического топлива.

В России природный газ остается одним из ключевых источников энергии. Например, около 60,7 % всей вырабатываемой электроэнергии приходится на тепловые электростанции (ТЭС), причем более половины этой доли – 47,8 % – генерируется именно на газовых станциях. Атомные станции производят 19,7 %, гидроэлектростанции – 19,1 %, тогда как другие источники, включая зеленую энергетику, составляют всего около 0,5 % [1].

Природный газ – дешевый и экологически чистый. В России его разведанные запасы насчитывают более 27 триллионов кубометров. Поэтому у страны есть хорошие перспективы для возможности развития его применения в различных отраслях, включая использование в качестве газомоторного топлива (ГМТ).

Современные тренды в области мировой торговли сжиженным природным газом (СПГ) приводят к изменениям в маршрутах международных магистральных трубопроводов и расширяют потенциальные рынки сбыта. Эти процессы не только ускоряют развитие технологий в сфере экспорта и импорта природного газа, но и подталкивают к разработке и внедрению новых проектов, связанных с использованием СПГ, учитывая его сильные и слабые стороны.

Цель исследования: анализ потенциала использования сжиженного природного газа в качестве альтернативного моторного топлива в транспортной отрасли с акцентом на его экологические, экономические и техногенные преимущества, а также оценка текущего состояния и перспектив развития инфраструктуры СПГ в России и за рубежом.

Особое внимание уделено применению СПГ в технологическом транспорте, в частности в карьерной технике, с целью выявления эффективности и целесообразности его внедрения в условиях горнодобывающей промышленности.

Методы исследований

В работе использованы следующие методы:

- аналитический метод – для изучения статистических данных по использованию СПГ в различных странах мира, включая объемы потребления, количество заправочных станций и автопарков;
- сравнительный анализ – для сопоставления СПГ с традиционными видами топлива (дизель, бензин) по экологическим, экономическим и эксплуатационным характеристикам;
- обобщение практического опыта – на основе кейсов внедрения СПГ в транспортных системах различных стран, включая Россию, Китай, Индию, страны ЕС и Латинской Америки;
- технико-экономический анализ – для оценки эффек-

тивности использования СПГ в карьерной технике, включая расчет экономии топлива, снижение выбросов и окупаемость инвестиций;

– эмпирический метод – на основе данных, полученных в ходе эксплуатации газодизельных и газовых карьерных самосвалов «БелАЗ», а также других видов техники, работающих на СПГ.

Результаты работы

Сравнение сжиженного природного газа с традиционными видами моторных топлив

СПГ имеет ряд преимуществ перед традиционными видами моторных топлив, такими как бензин и дизельное топливо. Благодаря наличию этих преимуществ СПГ активно конкурирует на рынке моторного топлива с традиционным топливом. Основные причины актуальности применения СПГ заключаются в экономическом, экологическом и техногенном аспектах.

Экологический аспект. В сравнении с нефтяными видами моторных топлив (бензин и дизель) СПГ оказывает менее пагубное воздействие на окружающую среду. Это связано с тем, что транспорт, работающий на СПГ, выделяет меньше вредных и канцерогенных веществ. К примеру, выбросов оксида серы (SO_x) в значительной степени меньше от автомобилей, работающих на СПГ, так как в нем практически не содержится сернистых соединений, а именно оксид серы является первоисточником появления кислотных дождей. Стоит отметить, что основным выбросом от использования СПГ является углекислый газ (CO_2), но даже его влияния значительно меньше по сравнению с традиционными нефтяными видами топлив.

Техногенный аспект. Двигатели, работающие на СПГ, менее шумные по сравнению с двигателями, работающими на традиционном топливе. Это особенно важно для городских условий, где шумовой фон может оказывать негативное воздействие на здоровье людей. Также стоит отметить, что двигатели на СПГ выделяют значительно меньше копоти и твердых частиц, что улучшает качество воздуха и облегчает обслуживание двигателя.

Экономический аспект. Экономическая выгода использования СПГ связана прежде всего с его стоимостью. В большинстве регионов мира СПГ оказывается дешевле традиционных нефтяных видов топлив. Это связано с тем, что добыча и переработка природного газа часто обходится дешевле, чем производство нефти и ее последующая переработка. Кроме того, переход на СПГ позволяет снизить затраты на техническое обслуживание автомобилей, так как двигатели на этом виде топлива работают дольше без необходимости замены масла и других расходных материалов.

Опыт использования сжиженного природного газа в качестве газомоторного топлива в мире

Существуют два способа использования метана в качестве моторного топлива на транспорте: в сжатом (КПГ) и сжиженном виде (СПГ).

Основное различие между ними заключается в способе хранения газа. КПГ хранится в баллонах под высоким давлением (200–250 бар), тогда как СПГ находится в специальных криогенных резервуарах при температуре -160°C . Главное преимущество СПГ перед КПГ состоит в значительном уменьшении занимаемого объема (примерно в 600 раз), что упрощает транспортировку топлива и увеличивает запас хода автомобиля благодаря высокой энергетической плотно-

сти. При использовании КПП требуется установка множества баллонов, что уменьшает полезный объем и грузоподъемность транспортного средства [2].

В настоящее время газомоторное топливо уже получило широкое распространение во многих странах мира. Однако Россия, обладая одними из самых крупных запасов природного газа, существенно отстает по уровню потребления этого вида топлива. По разным оценкам, в мире существует около 30 млн машин, которые работают на природном газе. Большинство этих машин, около 20,5 млн, находится в Азиатско-Тихоокеанском регионе. Самая высокая плотность этих автомобилей наблюдается в Китае, Иране, Индии и Пакистане (примерно 8,5, 6,2, 4,3 и 4,2 млн единиц транспорта соответственно). Природный газ популярен в Южной Америке, особенно в Аргентине, Бразилии и Колумбии: количество машин, работающих на газе, достигает 3,0, 2,6 и 0,8 млн единиц соответственно. В России же парк газомоторных автомобилей насчитывает лишь 260 тысяч единиц [3, 14].

СПГ наиболее оптимально использовать для технологического транспорта, потребляющего значительные объемы топлива. Для легковых машин и легкого коммерческого транспорта он не так хорош из-за своих особенностей. Поэтому именно магистральные грузовики становятся ключевыми потребителями СПГ. Использование СПГ в качестве моторного топлива развивается сравнительно недолго и сейчас парк магистральных тягачей, работающих на СПГ, включает около 450 тысяч единиц в Китае, 40 тысяч в Европе и около 5 тысяч в России. В Китае действует 4 100 криогенных заправочных станций, в Европейском союзе – 635, а в России – около 17 [4].

Рассмотрим опыт ключевых стран по применению СПГ в качестве газомоторного топлива.

Европейские региональные различия в плотности сети заправочных станций СПГ выглядят следующим образом:

- Испания, Португалия, Великобритания, Нидерланды и Северная Италия – относительно хорошее предложение;
- Франция и Бельгия за последние два года активно развивались;
- Польша и Германия – начало расширения сети;
- Скандинавия обычно ассоциируется с Био-СПГ.

Евросоюз (ЕС) уделяет особое внимание декарбонизации (в отличие от Китая, уделяющего особое внимание загрязнению воздуха). В ЕС работает программа финансирования инвестиций в инфраструктуру (до 50 % финансирования).

Германия. Компания Dena выступает модератором целевой группы по СПГ – в ноябре 2015 года создана совместная инициатива целевой группы по СПГ для большегрузных автомобилей. Заявленная цель поможет устранить препятствия для инвестиций и расширения использования СПГ в качестве топлива в Германии. СПГ – единственная доступная в настоящее время экономичная и экологичная альтернатива для большегрузных автомобилей. С момента предоставления финансирования было подано 1 390 заявок на гранты (994 грузовика на СПГ). По данным DENA, к 2025 году 25 тысяч грузовиков будут зарегистрированы на СПГ.

Франция. Дизельное топливо дает мощный импульс развитию газовых грузовиков, но вступили в силу налоговые льготы. В октябре 2015 года налог на дизельное топливо увеличился на 1 цент и еще раз – в 2017 году. Заявленная цель – вытеснение дизельного топлива. Произошло сокращение

налогооблагаемого дохода на 40 % от стоимости грузовика, работающего на СПГ.

Италия. С 1930 года Италия рассматривает природный газ в качестве топлива для транспортных средств, накопив большой научный, технический, промышленный и деловой опыт. По данным на 2019 год, статистика выглядит следующим образом: 1,7 млрд евро общего оборота, 90 лет опыта применения СПГ, 1 200 тысяч легковых автомобилей на СПГ, 2 600 грузовых автомобилей на СПГ, 1 350 заправочных станций, 20 тысяч сотрудников, 6 тысяч мастерских по модернизации транспорта.

Китай. Примерно 450 тысяч тяжелых грузовиков работает на природном газе. Около 4 100 объектов газозаправочной инфраструктуры при 160 тысячах традиционных заправок [3].

Иран. Иран сэкономил порядка 370 млн литров топлива, при переводе 213 тысяч единиц общественного транспорта на природный газ за два года, что в денежном выражении составляет порядка 126 млн долларов сокращения расходов бюджета. К 2026 году планируется завершить перевод 1,2 млн транспортных средств на природный газ. Для этих целей на государственном уровне был заключен контракт с 330 пунктами переоборудования [3].

Египет. Министр энергетики поручил перевести 100 тысяч автомобилей на природный газ в 2023 году. Дополнительно планируется построить 700 объектов газозаправочной инфраструктуры. В 2022 году среднее потребление газа в качестве моторного топлива составило 95 млн м³/мес. [3].

Индия. Нитин Гадкари – министр транспорта Индии утвердил направление развития автомобильного транспорта на природном газе в качестве стратегического (прим. СПГ). По словам министра, множество проблем с батареями при эксплуатации электромобилей в режиме высоких температур стали одной из ключевых причин отказа от электромобилей. На начало 2023 года в Индии насчитывалось 5 040 объектов газозаправочной инфраструктуры. Планируется расширение до 10 тысяч объектов в течение 10 лет. Цели экономики Индии подразумевают увеличить долю потребления газа с 7 до 15 %, сократить зависимость от импорта сырой нефти и расходы на импорт на 10 %, выполнять обязательства 21-й конференции сторон участников Рамочной конвенции ООН об изменении климата (COP21). С 2014 по 2019 год (за 5 лет) произошло увеличение ~100 % числа заправок сжатого природного газа (с 938 до 1 815), увеличение на ~80 % количества автомобилей на природном газе (с 1 945 103 до 3 503 215).

В таблице представлены уровень развития применения СПГ в 2019 году и перспективы применения до 2030 года [3].

Таблица / Table

Опыт Индии по применению сжиженного природного газа в качестве газомоторного топлива / India's experience in using LNG as a gas engine fuel

Характеристика	Показатель
Общий объем транспортных средств, использующих природный газ, в 2019 г.	3,5 млн
Общий объем транспортных средств, которые будут работать на природном газе к 2030 г.	30 млн
Количество заправочных станций для сжиженного природного газа в 2019 г.	1 815
Количество заправочных станций для СПГ к 2030 г.	8 303

Латинская Америка в целом

Сейчас в странах Латинской Америки примерно 5,5 млн машин работают на природном газе и более 5 700 заправочных станций, предлагающих это топливо. Аргентина и Бразилия – страны с наиболее развитыми рынками. В Боливии успешно реализуется программа перевода автомобилей на природный газ, продвигаемая национальным правительством. В Колумбии и Перу созданы крупные автопарки городских автобусов, использующих сжатый природный газ, при этом их развитие активно поддерживается государственными органами. Латинская Америка занимает второе место в мире по числу автомобилей, работающих на природном газе, после Азиатско-Тихоокеанского региона (свыше 19 млн единиц транспорта). Аргентина, Бразилия и Колумбия входят в число десяти стран с самым большим парком автомобилей, работающих на природном газе, а также с наибольшим количеством газовых заправок. Все они входят в топ-10 стран по запасам газа.

Бразилия. В 2022 года около 140 тысяч автомобилей перешли на природный газ. Рост ~2,6 млн транспортных средств на природном газе числится в Бразилии на конец 2022 года, из них ~1,6 млн – в Рио-де-Жанейро [3]. Бразилия является второй страной в Латинской Америке по количеству автомобилей с природным газом. Штат Рио-де-Жанейро располагает крупнейшим в стране парком автомобилей на природном газе. Министр энергетики Бразилии объявил, что страна планирует перевести парк грузовиков на природный газ. Они также планируют заменить тепловые электростанции, работающие на дизельном топливе, на другие, работающие на природном газе, пока истекают их контракты.

Боливия. В стране насчитывается более 390 тысяч транспортных средств на природном газе и около 250 заправочных станций сжатого природного газа. Исполнительная организация по переводу транспортных средств на природный газ (EEC-GNV) объявила о том, что 25 % автопарка Боливии переведено на КПП, что позволило сэкономить стране более 275 млн долларов США. Экспоненциальный рост поддерживается правительством страны посредством программы перевода автомобилей на природный газ с целью изменения энергетической сети страны, реализуемой Министерством углеводородов.

Мексика. В долине Мехико выбросы, генерируемые транспортными средствами, составляют до 60 % от общего загрязнения грубыми взвешенными частицами согласно исследованиям ООН. Самое тревожное то, что, по данным Всемирной организации здравоохранения, более 14 тысяч человек умирает в стране каждый год из-за болезней, связанных с загрязнением воздуха. В этом смысле использование КПП обеспечивает жизненно важные экологические преимущества. Кроме того, в Мехико транспортные средства, работающие на КПП, могут получить голограмму «0», которая освобождает их от программы «Нуо Но Сиркула» (политика ограничения движения, направленная на снижение заторов на дорогах). Рост рынка автомобилей на природном газе в Мексике идет экспоненциально, и об этом свидетельствуют огромный взлет и импульс, которые наблюдаются в последние годы. Теперь отрасль стремится в полной мере использовать работу этого бизнеса, чтобы воспользоваться экономическими и экологическими преимуществами этого топлива.

Нигерия. Реализуется соглашение между правительством

Исламской Республики Иран и Федеративной Республики Нигерия на 2,5 млрд долларов о создании порядка 70 центров по переоборудованию транспорта на метан. Планируется поставка комплектов для переоборудования более чем 1 млн транспортных средств и создание 1 тысячи объектов заправочной инфраструктуры.

Инфраструктура транспортировки, хранения и заправки сжиженного природного газа

При рассмотрении вопроса использования сжиженного природного газа на производственных объектах крайне важно уделить внимание инфраструктуре доставки, хранения и условий заправки газом. Без наличия развитых логистических схем и адекватных условий хранения внедрение СПГ становится затруднительным или вовсе невозможным.

Для транспортировки СПГ требуются специальные транспортные средства, способные поддерживать сверхнизкую температуру, необходимую для сохранения газа в жидком состоянии. Температура кипения СПГ составляет около -162 °С, что предъявляет особые требования к материалам и технологиям, применяемым в транспорте. Используются криогенные автоцистерны, танк-контейнеры и железнодорожные цистерны, специально разработанные для перевозки СПГ. Эти транспортные средства оснащены многослойной изоляцией и системами поддержания вакуума, что предотвращает нагревание газа и его испарение.

Эффективная логистика доставки СПГ включает планирование маршрутов, учет особенностей местности и обеспечение доступности транспортных путей. Необходимо предусмотреть регулярные поставки газа, учитывая расстояние между местами добычи/производства и потребителями. Это особенно важно для удаленных объектов, таких как карьеры или горнодобывающие площадки, где наличие постоянного источника топлива критично важно для обеспечения непрерывного производственного процесса. Безопасность транспортировки СПГ является приоритетом. Важно соблюдать строгие нормы и стандарты, касающиеся загрузки, разгрузки и движения транспорта. Специальные меры предосторожности включают мониторинг состояния цистерн, регулярное тестирование материалов и контроль над процессом охлаждения газа.

Помимо доставки, важным вопросом является процесс заправки техники, использующей СПГ. Эта техника требует специфического подхода к обслуживанию, включая систему заправочных станций и квалификацию обслуживающего персонала. Особенно это актуально для карьерной техники, которая работает в условиях высоких нагрузок и экстремальных температур. Учет этих нюансов важен для обеспечения бесперебойной работы производственного цикла.

Для долгого хранения СПГ используют специальные резервуары, которые выдерживают экстремальные холода. Они имеют многослойную теплоизоляцию и поддерживаемый вакуум. Это минимизирует передачу тепла и предотвращает нагрев газа. Резервуары бывают разных размеров и форм. Современные резервуары оснащены автоматическими системами контроля уровня жидкости, давления и температуры. Это позволяет следить за состоянием газа в реальном времени и предотвращать аварии. Есть системы регулировки давления, чтобы избежать перегрева и излишнего испарения газа. Места установки резервуаров должны быть защищены от пожаров, наводнений и землетрясений. Важно учитывать

климатические условия, так как они влияют на эффективность хранения газа.

Ярким примером созданной полноценной инфраструктуры по заправке СПГ газодизельных карьерных самосвалов «БелАЗ-75131» на участках горных выработок угольных разрезов можно считать проект, реализованный в Кузбассе. Малотоннажное производство СПГ и его последующая транспортировка на участки горных выработок осуществляется силами ООО «Сибирь-Энерго» (г. Новокузнецк) (рис. 1).



Рис. 1. Завод по сжижению природного газа (г. Новокузнецк) /
Fig. 1. Natural gas liquefaction plant (Novokuznetsk)

При этом для транспортировки СПГ используются мобильные криогенные передвижные автозаправщики (рис. 2).



Рис. 2. Криогенные передвижные автозаправщики /
Fig. 2. Cryogenic mobile gas stations

Заправка газодизельных карьерных самосвалов «БелАЗ-75131» осуществляется на участках горных выработок на специализированных заправочных площадках непосредственно с мобильных криогенных передвижных автозаправщиков (рис. 3) [5].



Рис. 3. Заправочная площадка сжиженного природного газа на участках горных выработок угольного разреза в Кузбассе /
Fig. 3. LNG refueling site at the mining sites of a coal mine in Kuzbass

Реализация подобного рода транспортно-заправочной инфраструктуры позволила бесперебойно и круглосуточно обеспечивать необходимым запасом СПГ газодизельных карьерных самосвалов «БелАЗ-75131» и осуществлять оперативное и мобильное перемещение заправочной площадки в зависимости от продвижения разрабатываемого угольного разреза.

Российский опыт использования сжиженного природного газа в качестве газомоторного топлива

Актуальность перехода на газомоторное топливо обуславливается сокращением расходов на горючее. Если смотреть глобально, то переход потенциально может благоприятно сказаться на экономическом развитии страны. Это связано с тем, что Россия обладает обширной территорией, и значительная часть себестоимости товаров приходится на транспортировку этих товаров от производителя к потребителю. Например, использование автомобилей «КамАЗ-5490 NEO», работающих на сжиженном природном газе или дизельном топливе (ДТ), показывает, что капитальные вложения в приобретение этих машин окупаются при пробеге около 220 тысяч километров, после чего эксплуатация транспорта на СПГ становится экономически выгоднее (рис. 4).

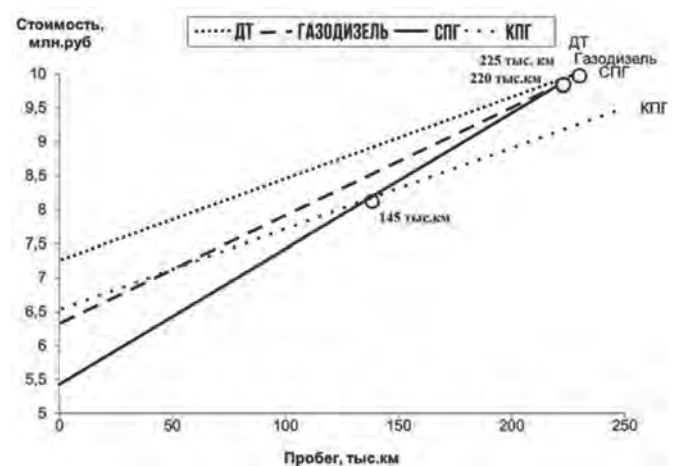


Рис. 4. Определение точек окупаемости переплат на покупку газовых аналогов «КамАЗ-5490 NEO» /

Fig. 4. Determination of payback points for overpayments for the purchase of KAMAZ 5490 NEO gas analogues

Применение компримированного природного газа (КПГ) ограничено из-за расположения автомобильных газовых наполнительных компрессорных станций (АГНКС) и небольшого запаса хода транспортных средств. Поэтому он лучше всего подходит для городских и пригородных маршрутов, включая общественный транспорт, коммунальную технику и коммерческий транспорт, работающий в пределах города. Если строительство такой инфраструктуры невозможно из-за нехватки сетевого газоснабжения, то в качестве альтернативы можно рассмотреть применение сжиженного природного газа (СПГ).

Использование машин на газе в городах помогает уменьшить загрязнение воздуха и шум от моторов, что улучшает качество жизни горожан. Примеры внедрения СПГ-автобусов включают проекты в Санкт-Петербурге и Магнитогорске Челябинской области, где совокупно используется около 2 500 автобусов на СПГ. Коммунальные машины на СПГ также применяются в Якутске (Республика Саха – Якутия) [6, 7].

Кроме того, перевод общественного и коммунального транспорта на природный газ требуется для исполнения распоряжения Правительства Российской Федерации.

В этом документе указаны цели по использованию природного газа на транспорте в городах с различной плотностью населения [8]:

- в городах с более чем 1 млн жителей – до 50 % автобусов и коммунальной техники;
- в городах с более чем 300 тысяч жителей – до 30 %;
- в городах с более чем 100 тысяч жителей – до 10 %.

Медленные темпы перевода на альтернативное топливо, такое как СПГ, обусловлены недостаточной развитостью производственной и сбытовой инфраструктуры. Большая часть действующих заправок сосредоточена в европейской части страны, обслуживая транспортные потоки между крупными городами, за исключением важного южного направления. На Дальнем Востоке заправки ориентированы преимущественно на удовлетворение потребностей корпораций, что сдерживает развитие СПГ-транспортировки. Недостаток малотоннажных комплексов СПГ, работающих на полную мощность, также затрудняет ускоренное строительство широкой сети заправочных станций (рис. 5).



Рис. 5. Текущее состояние производственно-сбытовой инфраструктуры сжиженного природного газа в России /
Fig. 5. Current state of LNG production and distribution infrastructure in Russia

Анализ применения сжиженного природного газа на карьерном транспорте

На сегодняшний день добыча полезных ископаемых открытым способом требует значительных затрат на транспортировку горной массы. В основном на карьерах для транспортировки используются тяжелые карьерные самосвалы с дизельными двигателями.

В настоящее время в российских горнодобывающих компаниях активно эксплуатируются карьерные самосвалы «БелАЗ» различной грузоподъемностью. С учетом растущих экологических и экономических требований к разработке полезных ископаемых открытым способом все больше проектов направлено на модернизацию этого типа карьерного транспорта. Например, в Кузбассе группа компаний успешно завершила проект по модернизации 70 карьерных самосвалов «БелАЗ-75131», оборудованных дизельными двигателями внутреннего сгорания, для дальнейшей эксплуатации с частичным замещением дизельного топлива сжиженным природным газом – метаном.

В рамках реализации проекта данные карьерные самосвалы были адаптированы под эксплуатацию в газодизельном

режиме и успешно работают на производственных площадках угледобывающих разрезов (рис. 6) [9].



Рис. 6. Газодизельные карьерные самосвалы «БелАЗ-75131» /
Fig. 6. BelAZ 75131 diesel mining dump trucks

Карьерные самосвалы, работающие на газодизельной смеси, вызывают значительный интерес. Использование газа, частично замещающего дизельное топливо, увеличило энергоэффективность транспортировки горных пород до 20 %. Сократило расходы на топливо более чем на 30 %. Заказчик может достичь экономического эффекта до 8,5 млн рублей в год благодаря использованию этой машины [10].

Исследования, проведенные учеными КузГТУ, касающиеся экологической эффективности использования 130-тонных газодизельных самосвалов «БелАЗ-75131», продемонстрировали их превосходство над дизельными аналогами. Это выражается в том числе и в снижении выбросов углекислого газа (CO_2) на 5–10 % (рис. 7), а также других канцерогенных соединений. Уровень задымленности (загазованности) на промышленных площадках горнодобывающих предприятий снижается. Это особенно важно зимой в Сибири, когда техника работает при низких температурах окружающей среды [9].

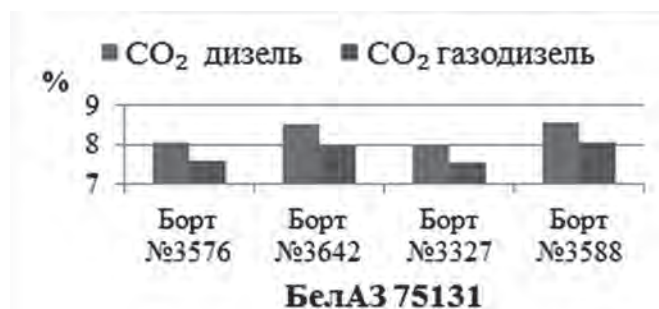


Рис. 7. Уровни CO_2 в отработавших газах при работе карьерных самосвалов «БелАЗ-75131» на дизельном и газодизельном топливе /
Fig. 7. CO_2 levels in exhaust gases during operation of BelAZ 75131 diesel and gas-diesel dump trucks

Компанией ОАО «БЕЛАЗ» в 2022 году был впервые представлен 90-тонный газовый самосвал модели «БелАЗ-7558Н». Данный карьерный самосвал работает на чистом сжиженном природном газе и оснащен емкими криогенными топливными баками суммарным объемом 1 740 литров, что позволяет работать без дозаправки около 10–11 часов.

В этом же году компания также представила новую модель карьерного самосвала с газовым поршневым двигателем – 30-тонный «БелАЗ-7540S». Помимо этого, ОАО «БЕЛАЗ» выпустило первый газовый самосвал на 45 тонн. Его испытания в реальной работе прошли в компании «Алроса» и продемонстрировали существенное уменьшение выбросов за-

грязняющих веществ в атмосферу до 10 раз, при этом затраты на топливо снизились в два раза по сравнению с дизельной версией. Клиенты могут сэкономить до 4 млн рублей ежегодно благодаря использованию этого автомобиля, что зависит от наличия газовых заправочных станций и стоимости газа у поставщиков. И, наконец, одной из последних инноваций компании является выпуск в 2024 году первого газового самосвала «БелАЗ-7513Р» грузоподъемностью 130 тонн, использующего в качестве моторного топлива только сжиженный природный газ метан. По расчетам специалистов, при эксплуатации данного 130-тонного карьерного самосвала на СПГ экономия на топливе по сравнению с классическим дизельным аналогом может составить от 10 млн рублей в год [11, 12].

Полученный уникальный опыт эксплуатации карьерных самосвалов различной грузоподъемности как газодизельных, так и чисто газовых с использованием в качестве моторного топлива сжиженного природного газа позволил трансформировать полученные инновационные технические решения на другие виды карьерной техники [15].

Так, в 2023 году в Кузбассе при участии компании «ТехноЭко» прошел успешные испытания первый отечественный газовый бульдозер «ЧЕТРА-Т11» (рис. 8). Бульдозер оснащен криогенной бортовой топливной системой, а также газовым двигателем китайского производства, что позволяет использовать на нем в качестве моторного топлива только СПГ [13].

Отдельно стоит отметить инновационные технические решения, примененные в самосвалах «БелАЗ-7513», оснащенных электрической трансмиссией и мотор-колесами. Такие конструкции действительно обладают рядом преимуществ перед традиционной техникой с двигателями внутреннего сгорания (ДВС).

Электрическая трансмиссия позволяет передавать мощность непосредственно на колеса, минуя механические передачи, что снижает потери энергии и повышает общую эффективность транспортного средства. Это особенно важно для тяжелой карьерной техники, работающей в условиях постоянных высоких нагрузок. Более того, сочетание электродвигателей с газодизельным двигателем делает возможным оптимизацию расхода топлива и снижение выбросов CO_2 .

Традиционные ДВС часто работают неэффективно в условиях переменной нагрузки, тогда как система с электрической трансмиссией позволяет поддерживать постоянную нагрузку на двигатель, обеспечивая максимальную производительность и минимальное загрязнение окружающей среды.

Таким образом, применение таких технических решений в карьере имеет потенциал для значительного повышения экономической и экологической эффективности работы предприятия.

Заключение

1. Сжиженный природный газ обладает значительными преимуществами по сравнению с традиционными видами топлива: он экологичнее, дешевле в эксплуатации и способствует снижению уровня шума и загрязнения воздуха.

2. Мировой опыт использования сжиженного природного газа в транспортной отрасли, особенно в тяжелом и технологическом сегменте, показывает его значительный потенциал как экологичной, технологичной и экономически выгодной альтернативы традиционным нефтепродуктам: СПГ имеет меньшую массу выбросов вредных веществ, сокращает эксплуатационные расходы и способствует уменьшению зависимости от бензина и дизеля (примером служат Китай, Индия, страны ЕС и Латинской Америки, где использование СПГ стабильно растет).

3. В России, несмотря на богатые запасы природного газа, внедрение СПГ замедлено из-за недостатка инфраструктуры, ограниченного доступа к технологиям и невысокой активности научно-исследовательских работ в этой области. Тем не менее успешные примеры применения СПГ в карьерной технике, такие как самосвалы «БелАЗ» и бульдозеры «ЧЕТРА», демонстрируют снижение выбросов CO_2 на 5–10 %, экономию топлива до 30 % и снижение эксплуатационных затрат, а развитие мобильных криозаправщиков, малотоннажных заводов СПГ и государственные инициативы создают реальные предпосылки для ускоренного перехода России на этот перспективный и конкурентоспособный альтернативный энергоноситель.

Выводы

1. В статье приведены результаты исследований, демонстрирующие экологические, экономические и техногенные преимущества использования сжиженного природного газа (СПГ) в транспортной отрасли, включая данные по снижению выбросов CO_2 на 5–10 %, экономии топлива до 30 % и уменьшению эксплуатационных затрат на примере карьерной техники и магистральных грузовиков, а также рассмотрены мировые тенденции и опыт развития СПГ-инфраструктуры в России и других странах.

2. Результаты исследований могут быть полезными при разработке стратегий перехода на альтернативные моторные топлива в транспортном секторе, планировании и внедрении инфраструктуры СПГ-заправок, оптимизации эксплуатации карьерной и тяжелой техники, а также при формировании государственной политики и бизнес-инициатив, направленных на повышение экологической безопасности и экономической эффективности транспортных систем с использованием сжиженного природного газа.



Рис. 8. Газовый бульдозер «ЧЕТРА-Т11» / Fig. 8. CHETRA T11 gas bulldozer

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ / REFERENCES

1. СО ЕЭС: «Доля ВИЭ, ГЭС и АЭС в выработке РФ к 2050 году вырастет с 39,3 до 56,8 %». *Переток.ру*. [The system operator of the Unified Energy System: "The share of renewable energy sources, hydroelectric power plants and nuclear power plants in the Russian Federation's generation will grow from 39.3% to 56.8% by 2050" (In Russ.)]. URL: <https://peretok.ru/news/strategy/24512>.
2. Актуальные вопросы технической эксплуатации и автосервиса подвижного состава автомобильного транспорта: Сборник научных трудов по материалам 82-й научно-методической и научно-исследовательской конференции МАДИ. Москва, 2024: 320. [Actual issues of technical operation and auto service of rolling stock of automobile transport: Collection of scientific papers based on the materials of the 82nd scientific-methodical and scientific-research conference of MADI. Moscow, 2024: 320 (In Russ.)]
3. Бургазлиев С. Развитие газомоторного транспорта в мире. Возможности России для новой программы развития газомоторного топлива. *Итоги выставки GASSUF-2023: презентации спикеров*. Москва, 2023. [Burgazliev S. Development of gas motor transport in the world. Russia's opportunities for a new program for the development of gas motor fuel. *Results of the GASSUF 2023 exhibition: speaker presentations*. Moscow, 2023 (In Russ.)]. URL: <https://ngvrus.ru/news/2023/10/30/itogi-vystavki-gassuf-2023.html>.
4. Пронин ЕП. Рынок газомоторных транспортных средств в текущих условиях: перспективы развития производства и расширение модельного ряда газомоторного транспорта и техники. *Итоги выставки GASSUF-2023: презентации спикеров*. [Pronin EP. The market of gas motor vehicles in the current conditions: prospects for the development of production and expansion of the model range of gas motor vehicles and equipment. *Results of the GASSUF 2023 exhibition: speaker presentations*. Moscow, 2023 (In Russ.)]. URL: <https://ngvrus.ru/news/2023/10/30/itogi-vystavki-gassuf-2023.html>.
5. Дубов ГМ, Трухманов ДС, Чегошев АА и др. Снижение техногенного воздействия на окружающую среду посредством использования альтернативных видов энергоносителей при эксплуатации тяжелых карьерных самосвалов. *Горное оборудование и электромеханика*. 2021;5(157):19-28. [Dubov GM, Tryhmanov DC, Chegoshev AA, et al. Reducing the anthropogenic impact on the environment through the use of alternative energy sources during the operation of heavy mining dump trucks. *Mining equipment and electromechanics*. 2021;5(157):19-28 (In Russ.)]. DOI: 10.26730/1816-4528-2021-5-19-28.
6. Российский рынок газомоторного топлива: достижимы ли амбициозные цели? *Neftegaz.RU*. [Russian gas motor fuel market: are ambitious goals achievable? *Neftegaz.RU* (In Russ.)]. URL: <https://magazine.neftegaz.ru/articles/rynok/740267-rossiyskiy-rynok-gazomotornogo-toplivados-tizhimy-li-ambitsioznye-tseli>.
7. Шатров МГ, Яковенко АЛ, Кричевская ТЮ. Шум автомобильных двигателей внутреннего сгорания: Учебное пособие. Москва, 2014: 23. [Shatrov MG, Yakovenko AL, Krichevskaya TYu. Noise of automobile internal combustion engines. Study guide. Moscow, 2014: 23 (In Russ.)]
8. О регулировании отношений в сфере использования газового моторного топлива, в том числе природного газа в качестве моторного топлива: Распоряжение Правительства Российской Федерации от 13.05.2013 № 767-р. [Order of the Government of the Russian Federation dated 13.05.2013 No. 767-r "On regulation of relations in the sphere of use of gas motor fuel, including natural gas as a motor fuel (In Russ.)]. URL: <http://publication.pravo.gov.ru/document/0001201305170003>.
9. Дубов ГМ, Нохрин СА, Ходоровский СК и др. Сжиженный природный газ, как перспективный вид моторного топлива для карьерных самосвалов. *Транспортное, горное и строительное машиностроение: наука и производство*. 2023;23:205-13. [Dubov GM, Nokhrin SA, Khodorovsky SK, et al. Liquefied natural gas as a promising type of motor fuel for quarry dump trucks. *Transport, mining and construction engineering: science and production*. 2023;23:205-13. (In Russ.)] DOI: 10.26160/2658-3305-2023-23-205-213.
10. БЕЛАЗ-7558Н: первый в мире 90-тонный самосвал на сжиженном природном газе. *Золото и технологии*. [BELAZ-7558N: the world's first 90-ton dump truck on liquefied natural gas. *Gold and technology* (In Russ.)] URL: <https://zolteh.ru/tekhnika/belaz-7558n-pervyy-v-mire-90-tonnyu-samosval-na-szhizhenom-prirodnom-gaze>.
11. Газовые самосвалы БЕЛАЗ. *Горная промышленность*. [BELAZ gas dump trucks. *Mining* (In Russ.)]. URL: <https://mining-media.ru/ru/article/transport/18629-gazovye-amosvaly-belaz>.
12. Карьерные самосвалы на газовом топливе. *Золото и технологии*. [Gas-fueled quarry dump trucks. *Gold and technology* (In Russ.)]. URL: <https://zolteh.ru/tekhnika/karernye-samosvaly-na-gazovom-toplive>.
13. Дубов ГМ, Дворовенко ИВ, Нохрин СА. Природный газ как перспективная альтернатива дизельному топливу для карьерной техники. *Развитие производительных сил Кузбасса: история, современный опыт, стратегия будущего: мат-лы Межд. науч.-практ. конф.: в 4 т.* Москва, 2024:244-9. [Dubov GM, Dvorovento IV, Nokhrin SA. Natural gas as a promising alternative to diesel fuel for quarry equipment. *Development of productive forces of Kuzbass: history, modern experience, strategy of the future: Proceedings of the International scientific and practical conference. In 4 volumes*. Moscow, 2024:244-9 (In Russ.)]
14. Марков ВА. Проблемы использования природного газа в качестве моторного топлива для городского автотранспорта. *Грузовик*. 2015;4:6. [Markov VA. Problems of using natural gas as a motor fuel for urban vehicles. *Truck*. 2015;4:6 (In Russ.)]
15. Голубенко НВ. Об использовании природного газа в качестве моторного топлива в целях экологизации автотранспорта. *Современные автомобильные материалы и технологии (САМИТ-2015): сб. ст. VII Межд. науч.-техн. конф.* Курск, 2015: 32-4. [Golubenko NV. On the use of natural gas as motor fuel for the purpose of ecologisation of motor transport. *Modern Automobile Materials and Technologies (SAMIT-2015): collection of articles of the VII International Scientific and Technical Conference*. Kursk, 2015:32-4 (In Russ.)]

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ

Георгий Михайлович Дубов –

канд. техн. наук, доцент, Кузбасский государственный технический университет имени Т. Ф. Горбачева, 650000, г. Кемерово, Российская Федерация, e-mail: dubovgm@kuzstu.ru

Мария Юрьевна Яцевич –

канд. философ. наук, доцент, Кузбасский государственный технический университет имени Т. Ф. Горбачева, 650000, г. Кемерово, Российская Федерация, e-mail: yamu.phil@kuzstu.ru

ABOUT THE AUTHORS

Georgy Mikhailovich Dubov –

C. Sc. in Engineering, Associate Professor, T.F. Gorbachev Kuzbass State Technical University, 650000, Kemerovo, Russian Federation, e-mail: dubovgm@kuzstu.ru

Maria Yurievna Yatsevich –

C. Sc. in Philosophy, Associate Professor, T.F. Gorbachev Kuzbass State Technical University, 650000, Kemerovo, Russian Federation, e-mail: yamu.phil@kuzstu.ru

Данил Александрович Бороненков –
аспирант, Кузбасский государственный технический
университет имени Т. Ф. Горбачева, 650000, г. Кемерово,
Российская Федерация, e-mail: danil.boronenkov@inbox.ru

Danil Alexandrovich Boronenkov –
Post-graduate Student, T.F. Gorbachev Kuzbass State Technical
University, 650000, Kemerovo, Russian Federation,
e-mail: danil.boronenkov@inbox.ru

Даниил Максимович Якобсон – аспирант, Кузбасский
государственный технический университет
имени Т. Ф. Горбачева, 650000, г. Кемерово, Российская
Федерация, e-mail: daneel3000@gmail.com

Daniil Maximovich Yakobson –
Post-graduate Student, T.F. Gorbachev Kuzbass State Technical
University, 650000, Kemerovo, Russian Federation, e-mail:
daneel3000@gmail.com

Критерии авторства / Contribution:

Г. М. Дубов – научный менеджмент, концептуализация исследования, сбор и анализ данных, выводы; М. Ю. Яцевич – постановка исследовательской задачи, выводы, написание текста; Д. А. Бороненков – проведение исследований, обработка результатов; Д. М. Якобсон – обзор литературы, сбор и анализ данных. Все авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи / G.M. Dubov – research management, conceptualisation of the study, data collection and analysis, conclusions; M. Yu. Yatsevich – setting the research problem, conclusions, writing the text; D. A. Boronenkov – research management, processing of results; D. M. Yakobson – literature review, data collection and analysis. All authors read and approved the final version of the manuscript.

Конфликт интересов / Conflict of interest:

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов. / The authors declare no conflict of interest.

Информация о статье

Поступила в редакцию: 13.03.2025.

Поступила после рецензирования: 12.04.2025.

Принята к публикации: 24.06.2025.

Article info

Received: 13.03.2025.

Revised: 12.04.2025.

Accepted: 24.06.2025.