ISSN 1816-4528 (Print) **ISSN 2949-0634 (Online)**

Научная статья

УДК 622.684
DOI: 10.26730/1816-4528-2026-4-93-103

Дубов Георгий Михайлович[1*], Нохрин Сергей Алексеевич[2], Бороненков Данил Александрович[1], Якобсон Даниил Максимович[1]

[1] Кузбасский государственный технический университет имени Т. Ф. Горбачева
[2] Общество с ограниченной ответственностью «ТехноЭко»

[*] для корреспонденции: nikokem@mail.ru

КРИОГЕННАЯ БОРТОВАЯ ТОПЛИВНАЯ СИСТЕМА ГАЗОДИЗЕЛЬНЫХ КАРЬЕРНЫХ САМОСВАЛОВ БЕЛАЗ

Аннотация.
В условиях перманентного санкционного давления и жесткой рыночной конкуренции перед отечественным горнодобывающим комплексом и в особенности перед его угольным сегментом остро встает вопрос снижения операционных издержек. Одним из наиболее эффективных рычагов минимизации себестоимости открытых горных работ признана оптимизация расходов на топливно-энергетические ресурсы, потребляемые карьерными самосвалами в процессе перемещения вскрыши и полезного ископаемого. В представленной работе проведен анализ реализуемых в настоящее время инновационных проектов, ориентированных на диверсификацию нефтяного (дизельного) моторного топлива, используемого на грузовом автотранспорте и, в частности, на карьерных самосвалах БелАЗ. В качестве примеров приведены последние инновационные проекты ОАО «БелАЗ» по созданию карьерных самосвалов на более дешевых и экологически более чистых энергоносителях: водороде, электрической энергии, сжиженном природном газе. Отмечается, что одним из успешных примеров реализации данной стратегии в Кузбассе выступает масштабный проект по технологической модернизации парка самосвалов «БелАЗ». Посредством интеграции криогенных бортовых топливных систем на тяжелые карьерные самосвалы их переводят на двухтопливный (газодизельный) режим работы, при котором сжиженный природный газ выступает в качестве экономически выгодной альтернативы, частично замещающей традиционное дизельное топливо. В работе особое внимание уделено описанию узлов и компонентов, а также принципу работы инновационной криогенной бортовой топливной системы, устанавливаемой на тяжелые газодизельные карьерные самосвалы БелАЗ. Представлены разработанные ключевые группы технических требований к криогенной бортовой топливной системе, позволяющей осуществлять в процессе эксплуатации карьерных самосвалов БелАЗ частичное замещение (от 30 до 50%) дизельного топлива природным газом.

Информация о статье
Поступила:
12 июня 2026 г.

Одобрена после рецензирования:
01 сентября 2026 г.

Принята к печати:
15 сентября 2026 г.

Ключевые слова:
карьерный самосвал БелАЗ, криогенная бортовая топливная система, газодизельный режим работы, газомоторное топливо, сжиженный природный газ, метан

Для цитирования: Дубов Г.М., Нохрин С.А., Бороненков Д.А., Якобсон Д.М. Криогенная бортовая топливная система газодизельных карьерных самосвалов БелАЗ // Горное оборудование и электромеханика. 2026. № 4 (186). С. 93-103. DOI: 10.26730/1816-4528-2026-4-93-103, EDN: ZECMXC

Введение

Для карьерных самосвалов БелАЗ, осуществляющих на участках горных выработок транспортировку вскрышных пород и полезных ископаемых, основным видом энергоносителя является нефтяное (дизельное) моторное топливо [1]. За последние несколько лет, в период с 2019 по 2026 гг., отмечается значительный рост стоимость дизельного топлива [2]. Это, в свою очередь, приводит к удорожанию транспортных расходов при транспортировке горной массы и, как следствие, к увеличению себестоимости добычи полезных ископаемых, в том числе и угля.

Помимо этого, одной из актуальных проблем при транспортировке горной массы является и негативное (техногенное) воздействие на окружа-

ющую среду карьерных самосвалов, оснащенных дизельными двигателями внутреннего сгорания. По разным оценкам в настоящее время в мире насчитывается порядка 28 000 карьерных самосвалов, осуществляющих выброс около 68 млн т углекислого газа (диоксида углерода CO_2) [3]. В этой связи на сегодняшний день реализуется ряд инновационных проектов по внедрению и использованию более дешевых и экологически более чистых альтернативных энергоносителей в качестве моторного топлива для грузового автотранспорта. В частности, такими известными мировыми компаниями, как Toyota, Nikola Motor Co, Hyundai Motor, Daimler, JMC Heavy Duty Vehicle Co., Ltd разработаны и находятся в опытной эксплуатации грузовые автомобили на водородных топливных элементах [4–8]. ОАО «БЕЛАЗ» выпустил в опытную эксплуатацию на Сахалине первый в мире 130-тонный карьерный самосвал БелАЗ-7513V на водородном топливе, а в 2025 году компанией запущен уже новый проект по созданию 220-тонного водородного карьерного самосвала БелАЗ [9–10].

Перспективным направлением развития карьерных самосвалов БелАЗ является использование в качестве энергоносителя электрической энергии. Так, специалистами завода были разработаны и выпущены 90-тонный карьерный самосвал БелАЗ-7558Е и 120-тонный карьерный самосвал БелАЗ-7513Е, работающие на электрической энергии (аккумуляторных батареях). В рамках реализации инновационных проектов по электрификации карьерного транспорта, объединяющей преимущества дизельных и троллейбусных технологий, создан первый экспериментальный дизель-троллейвоз БелАЗ-7530Е грузоподъемностью 220 т. Самосвал работает от контактной сети с помощью штанговых токоприемников (троллейный режим), а на участках без проводов движение осуществляется за счет мощного дизельного двигателя Cummins QSK60-C [11–12].

На сегодняшний день Российская Федерация обладает колоссальными запасами природного газа. По данным группы «Газпром» по состоянию на 31 декабря 2024 года только разведанные запасы природного газа на территории России составили 27 811,8 млрд м^3, а газового конденсата – 1 242,4 млн т [13]. Такое положение дел на ближайшие десятилетия делает природный газ наиболее перспективным моторным топливом для карьерных самосвалов (Рис. 1) [4, 8]. Этот факт подтверждают и слова Леонида Трухнова – главного конструктора карьерной техники ОАО «БЕЛАЗ», утверждающего, что наиболее перспективным направлением на данный момент является использование карьерной техники, работающей именно на природном газе [12].

В период с 2022 по 2026 гг. на разрезах Кузбасса, входящих в УК «Кузбассразрезуголь», планомерно стали выходить в эксплуатацию карьерные самосвалы БелАЗ различной грузоподъемности, оснащенные газовыми двигателями внутреннего сгорания и использующие в качестве топлива сжиженный природный газ (СПГ). В 2022 году вышли в опытную эксплуатацию 10 карьерных самосвалов БелАЗ-7558Н (г/п 90 т). В 2024 году ОАО «БЕЛАЗ» выпустил единственный в своем роде газовый карьерный самосвал БелАЗ-7513Р (г/п 130 т). В 2026 году на выставке «Уголь России и Майнинг-2026» (г. Новокузнецк) был представлен карьерный самосвал БелАЗ-7530Р (г/п 220 т), с газопоршневым двигателем мощностью 2335 л.с. По прогнозам специалистов ежегодная экономия на топливе с одного такого самосвала составит порядка 35 млн российских рублей [14–16].

В ряду инновационных проектов, реализуемых в настоящее время и связанных с диверсификацией энергоносителей для карьерных самосвалов, являются проекты по их модернизации для последующей работы в газодизельном режиме с использованием в качестве моторного топлива сжиженного природного газа. Начиная с 2017 года в Кемеровской области – Кузбассе запущен инновационный проект по оснащению крио-

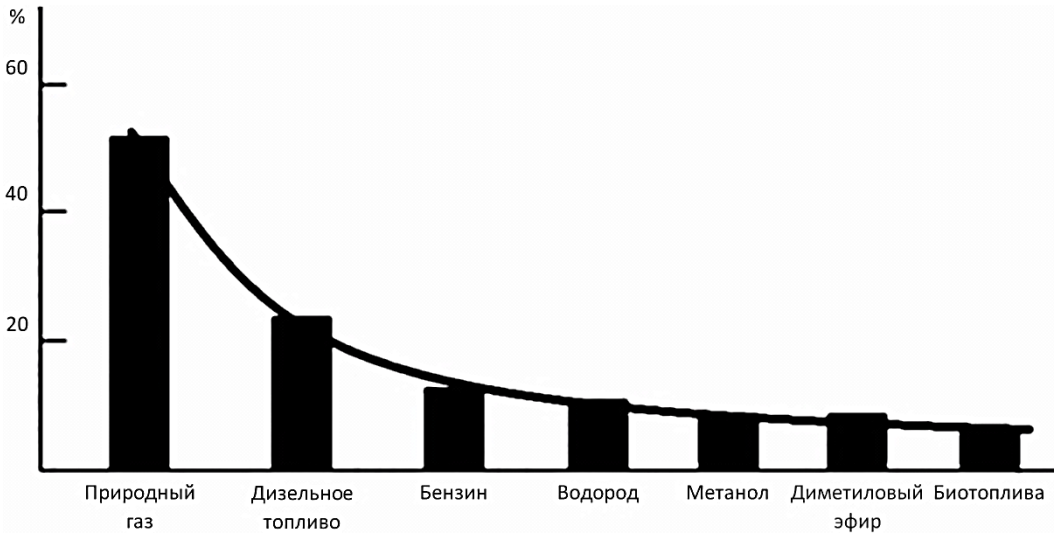

Рис. 1. Прогнозируемый баланс расхода энергоносителей используемых в качестве моторных топлив на 2050 г. [4, 8]

Fig. 1. Projected balance of energy consumption used as motor fuels in 2050 [4, 8]

генными бортовыми топливными системами (КБТС) серийно выпущенных дизельных 130-тонных карьерных самосвалов БелАЗ-75131 и 220-тонного карьерного самосвала БелАЗ-75306. Осуществление данной модернизации впоследствии позволяет эксплуатировать карьерные самосвалы в битопливном (газодизельном) режиме с частичным (от 30 до 50%) замещением дизельного топлива сжиженным природным газом [17–19]. В рамках реализации данного проекта разработаны и запатентованы способы по установке криогенных топливных баков на борту карьерных самосвалов БелАЗ серий 75131 (г/п 130 т) и 75306 (г/п 220 т) для возможности их последующей эксплуатации в газодизельном режиме с использованием сжиженного природного газа [20–21]. Разработана криогенная бортовая топливная система, устанавливаемая на борту серийно выпускаемых карьерных самосвалов БелАЗ и успешно зарекомендовавшая себя при эксплуатации в реальных производственных условиях на участках горных выработок угольных разрезов Кузбасса [22–24]. Эффективность реализации подобного рода проектов подтверждена многолетней промышленной эксплуатацией (начиная с 2017 года) карьерных самосвалов БелАЗ-75131 на участках горных выработок. Помимо этого факта, необходимо отметить и объективную актуальность реализации подобного рода проектов, обусловленную наличием колоссального количества в Российских горнодобывающих компаниях тяжелых карьерных самосвалов БелАЗ грузоподъемностью от 130 до 360 т, для которых, как показал полученный опыт, наиболее целесообразно проведение данной модернизации для повышения эколого-экономической эффективности транспортировки горной массы.

Цель работы

Раскрыть принцип работы криогенной бортовой топливной системы газодизельных карьерных самосвалов БелАЗ посредством представления последовательности взаимодействия входящих в ее состав узлов и компонентов, обеспечивающих частичное замещение дизельного топлива парообразным природным газом.

Результаты и обсуждения

Объектом исследования является газодизельный карьерный самосвал БелАЗ (на примере модели 75131). Предметом исследования является криогенная бортовая топливная система (КБТС). Технологическая схема КБТС представлена на Рис. 2.

Архитектура криогенной системы питания бортового базирования включает в себя комплекс взаимосвязанных узлов и компонентов (Рис. 2). В ее состав входят криогенные топливные баки (КТБ) – изотермические емкости для хранения СПГ (1, 2) с периферийной арматурой заправки (3) и обратной магистрали (4), оснащенной газовозвратными вентилями (5, 6) и клапанами избыточного давления (7, 8). Транспортировка жидкой фазы метана осуществляется по криогенным трубопроводам (9, 10) через запорные вентили (11, 12) под контролем манометрических приборов (13, 14), при этом аварийный сброс давления регулируется клапанами (15, 16), соединенными со сбросным коллектором (17). Термическая обработка СПГ локализована в испарителе (18), откуда природный газ в парообразном виде по трубчатым контурам (19, 20, 21) направляется к управляемым отсечным клапанам (22, 23, 24). Элементы тонкой очистки и регулирования расхода представлены фильтрующим элементом (25), соленоидным электроклапаном (26) и газовым редуктором (27), распределяющим поток по форсуночным рампам (28, 29). Мониторинг и стабилизация параметров газовой среды возложены на изме-

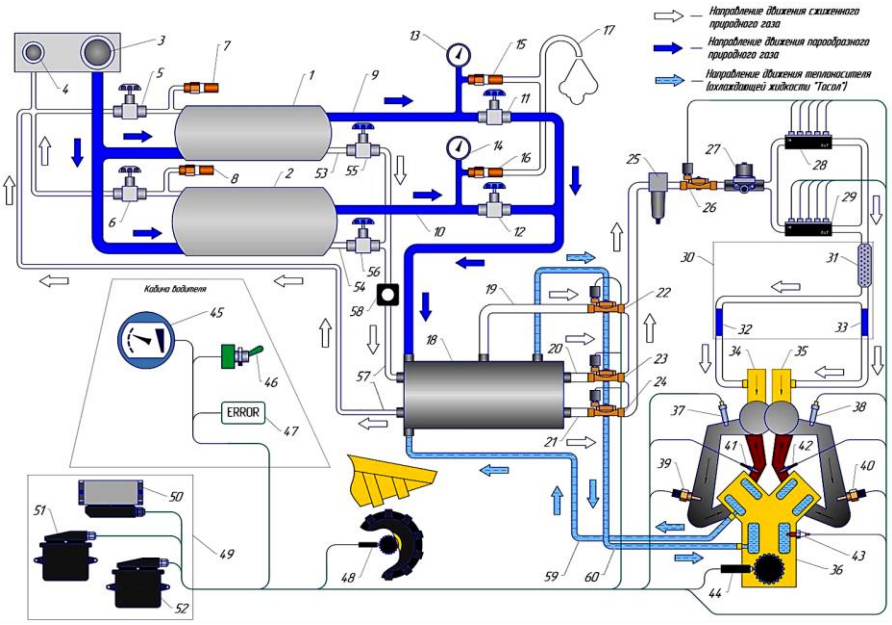

Рис. 2. Технологическая схема криогенной бортовой топливной системы карьерных самосвалов БелАЗ (на примере модели БелАЗ-75131) [21]
Fig. 2. Flow chart of the cryogenic on-board fuel system of BelAZ mining dump trucks (using the BelAZ-75131 model as an example) [21]

рительный модуль (30), включающий демпфергаситель пульсаций давления газа (31) и приборы учета расхода газа (32, 33), сопряженные с эжекторами (34, 35) дизельного двигателя внутреннего сгорания (ДВС) (36). Информационно-измерительная сеть ДВС укомплектована датчиками давления наддува (37, 38), датчиками температурного режима воздуха на впуске (39, 40), датчиками степени нагрева выхлопных газов (41, 42), датчиком температуры жидкого теплоносителя – антифриз (43), а также синхронизатором фаз коленчатого вала (44). Органы управления в кабине водителя карьерного самосвала включают приборы индикации запаса и давления СПГ (45), переключатель режимов эксплуатации карьерного самосвала («газодизель/дизель») (46) и диагностический индикатор (47). Динамика параметров движения самосвала определяется колесным датчиком скорости (48), передающим сигналы в комплекс управления КБТС (49), состоящий из блока управления термопарами (50), блока управления форсунками (51) и центрального блока управления (52). Линия подогрева полости криогенных топливных баков объемом 500 и 850 литров представлена подогревательными отводами (53, 54), оснащенными соответственно запорными вентилями (55, 56). Отводы (53, 54) объединяются в единый трубопровод линии подогрева (57) (с регулятором давления (58)), который интегрирован в испаритель (18), подвод и отвод антифриза к которому осуществляется посредством подводящего (59) и отводящего (60) патрубков.

Динамика функционирования представленной газовой криогенной системы питания карьерных самосвалов подчинена следующему алгоритму (Рис. 2). Наполнение криогенных топливных баков (КТБ) (1, 2) жидким криопродуктом (СПГ) производится посредством специализированной периферийной арматуры заправки (3). Дренаж паровой фракции метана из КТБ (1, 2) в обратную магистраль (4) идет через отсечную арматуру – газовозвратные вентили (5, 6), защищенную дублирующими клапанами избыточного давления (7, 8). Первичный пуск и прогрев дизельного ДВС (36) выполняются по классической схеме с использованием традиционного жидкого нефтепродукта (дизельного топлива). Снижение термической нагрузки на элементы ДВС (36) обеспечивается циркуляцией жидкого антифриза в закрытом контуре охлаждения. Как только температура жидкого теплоносителя достигает температуры 80°С, формируя достаточный тепловой потенциал испарения и перегрева СПГ, водитель самосвала вручную активирует газодизельный цикл посредством двухпозиционного переключателя (46). В условиях битопливного (газодизельного) функционирования базовым энергетическим компонентом является дизельное топливо, однако его доля частично замещается порцией перегретого парообразного природного газа (в диапазоне от 30 до 50%). Поступающий в цилиндры жидкий нефтепродукт (дизтопливо) в данном случае выступает исключительно в роли инициатора горения (запальной дозы – поджига), обеспечивая впоследствии воспламенение подготовленной газовоздушной смеси в камерах сгорания ДВС (36). Нагретый антифриз по подводящему патрубку (59) непрерывно поступает в полость испарителя (18), создавая стабильное температурное поле для фазового перехода СПГ из жидкого в парообразное состояние. Отвод охлажденного жидкого антифриза из внутренней полости испарителя (18) и его возвращение в рубашку охлаждения ДВС осуществляется через отводящий патрубок (60). Криогенное топливо (СПГ) вытесняется из криогенных топливных баков (1, 2) в криогенные трубопроводы (9, 10), где, минуя запорные вентили (11, 12), манометрические приборы (13, 14) и клапаны (15, 16) со сбросным коллектором (17), направляется в испаритель (18) для последующего доведения до парообразного состояния. Конструкция испарителя (18) базируется на каскаде как минимум из трех последовательных трубчатых контуров (19, 20, 21), каждый из которых обладает индивидуальной (различной) площадью теплообмена и вводится в рабочий процесс дискретно с помощью управляемых отсечных клапанов (22, 23, 24). Наличие многоконтурной схемы в испарителе (18) позволяет оперативно масштабировать активную площадь теплообмена в условиях низких внешних температур окружающей среды зимнего и переходных периодов (весны и осени), гарантируя стабильное получение парообразного природного газа, перегретого до температуры не ниже 40°С.

На выходе из испарителя (18) сухой перегретый парообразный газ подвергается очистке в фильтрующем элементе (25), далее проходит через соленоидный электроклапан (26), редуцируется по давлению в газовом редукторе (27) и распределяется к форсуночным рампам (28, 29). Затем парообразный газ стабилизируется в измерительном модуле (30) посредством демпфера-гасителя пульсаций давления газа (31), измеряется приборами учета расхода газа (32, 33) и через эжекторы (34, 35) подается непосредственно в камеры сгорания ДВС (36).

С целью компенсации падения давления внутри криогенных топливных баков разной емкости (500 и 850 л) предусмотрены независимые подогревательные отводы (53) и (54). Данные отводы снабжены индивидуальными запорными вентилями (55) и (56) соответственно. Обе ветки независимых подогревательных отводов (53) и (54) коммутируются в единый трубопровод линии подогрева (57), параметры давления газа в котором корректируются регулятором давления (58). Трубопровод линии подогрева (57) замыкается через внутреннее пространство испарителя (18), формируя замкнутый циркуляционный контур, направленный обратно в полости криогенных топливных баков (1, 2).

Сбор телеметрии о текущем теплофизическом состоянии дизельного двигателя внутреннего сгорания (36) возложен на измерительные датчики давления наддува (37, 38), датчики температурного режима воздуха на впуске (39, 40), датчики степени нагрева выхлопных газов (41, 42), датчик температуры жидкого теплоносителя – антифриза (43) и синхронизатор фаз коленчатого вала (44). Сгенери-

рованные моторными датчиками (37–43) сигналы вкупе с данными от внутрикабинных устройств, а именно приборов индикации запаса и давления СПГ 45, переключателя режимов эксплуатации карьерного самосвала («газодизель/дизель») 46, диагностического индикатора 47 и колесного датчика скорости (48), транслируются в комплекс управления КБТС (49), в который входит блок управления термопарами (50), форсунками (51) и центральный блок управления (52).

Интеграция измерительного модуля (30) в криогенную бортовую топливную систему дает возможность осуществлять прецизионный учет расхода и количества подаваемого в дизельный двигатель внутреннего сгорания (36) газа и вычислять процент замещения дизельного топлива газом. Наличие в измерительном модуле (30) демпфера-гасителя пульсаций давления газа (31) позволяет эффективно сглаживать скачки давления, возникающие вследствие циклической работы форсуночных рамп (28, 29), гарантируя тем самым детонационную стойкость и плавность работы ДВС (36) в битопливном (газодизельном) режиме.

Принципиальным отличием технологических схем криогенных бортовых топливных систем карьерных самосвалов БелАЗ различной грузоподъемности является метод установки криогенных топливных баков – изотермических емкостей для хранения СПГ на борту самосвалов и их конструкция. В частности, на карьерных самосвалах БелАЗ-75131 (г/п 130 т) два криогенных топливных бака объемом 850 и 500 литров размещаются на палубе, справа по ходу движения (Рис. 3) [16, 22]. На карьерных самосвалах БелАЗ-75306 (г/п 220 т) один криогенный топливный бак объемом до 2000 литров размещается на правом лонжероне рамы самосвала, справа по ходу движения между передней и задней осями карьерного самосвала (Рис. 4) [17, 20]. Такие принципиальные различия в инсталляции на самосвалах криогенных топливных баков обусловлены радом факторов, а именно технологическими, конструктивными, эргономическими, эксплуатационными и затратными.

Учитывая инновационную составляющую криогенной бортовой топливной системы газодизельных карьерных самосвалов БелАЗ, одним из важных условий при ее разработке являлось формирование группы технических требований к ней. Объективной причиной этого являлось отсутствие на сегодняшний день подобного рода нормативных документов, определяющих концепцию криогенной бортовой топливной системы и позволяющих осуществлять модернизацию карьерных самосвалов БелАЗ непосредственно в условиях транспортных подразделений горнодобывающих компаний согласно установленного регламента, положений и действующих

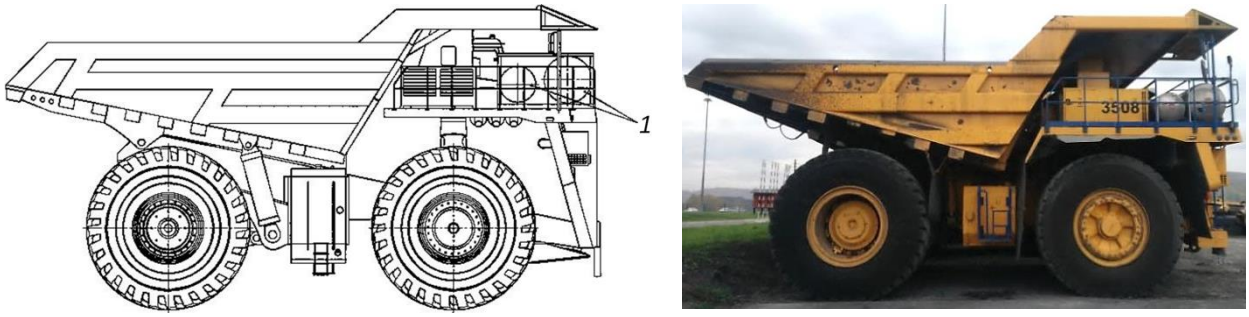

Рис. 3. Газодизельный карьерный самосвал БелАЗ-75131, оснащенный криогенной бортовой топливной системой (1 – криогенные топливные баки объемом 500 и 850 литров)
Fig. 3. Gas-diesel quarry dump truck BelAZ-75131 equipped with a cryogenic on-board fuel system (1 – cryogenic fuel tanks with a capacity of 500 and 850 liters)

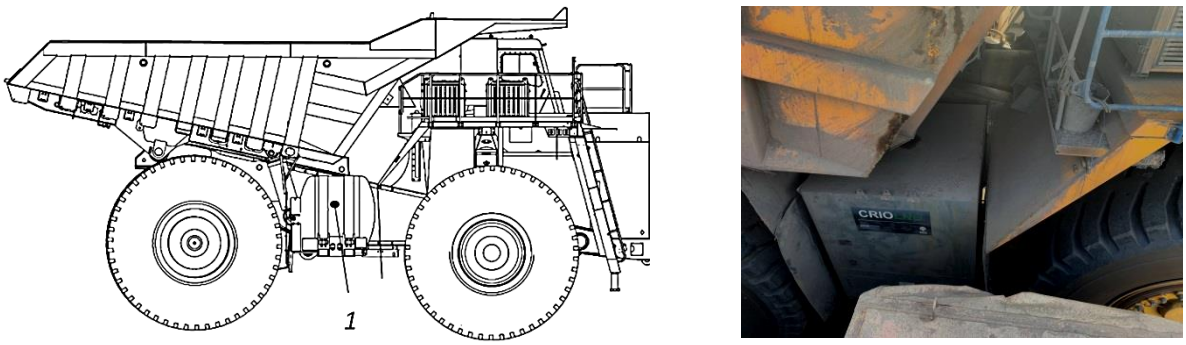

Рис. 4. Газодизельный карьерный самосвал БелАЗ-75306 оснащенный криогенной бортовой топливной системой (1 – криогенный топливный бак объемом 2000 литров)
Fig. 4. Gas-diesel quarry dump truck BelAZ-75306 equipped with a cryogenic on-board fuel system (1 – cryogenic fuel tank with a capacity of 2000 liters)

ГОСТов, учтенных в технических требованиях. Необходимо отметить, что действующие на сегодня национальные стандарты на криогенные бортовые топливные системы, а именно ГОСТ 34601- 2019 и ГОСТ 34602-2019, нельзя полноценно использовать по отношению к карьерным самосвалам БелАЗ. Это вызвано спецификой данной карьерной техники, не относящейся ни к одной из категорий автомобильных транспортных средств M и N, на которые распространяются вышеуказанные ГОСТы. Это обстоятельство в том числе также мотивировало к необходимости разработки оригинальных технических требований к КБТС карьерных самосвалов БелАЗ.

Специфичность разработанных технических требований обусловлена восемнадцатью сформированными ключевыми группами (Рис. 5), включающими требования к конструктивным, монтажным, эргономическим, эксплуатационным и другим особенностям криогенной бортовой топливной системы. Необходимо также подчеркнуть, что одной из важных особенностей является то, что данные требования разработаны с учетом предполагаемой эксплуатации газодизельных карьерных самосвалов БелАЗ, оснащенных КБТС, в неблагоприятных климатических условиях, сопряженных с низкими температурами окружающей среды.

Выводы

1. Трансформация дизельного двигателя внутреннего сгорания карьерного самосвала БелАЗ-75131 на газодизельный цикл эксплуатации посред-

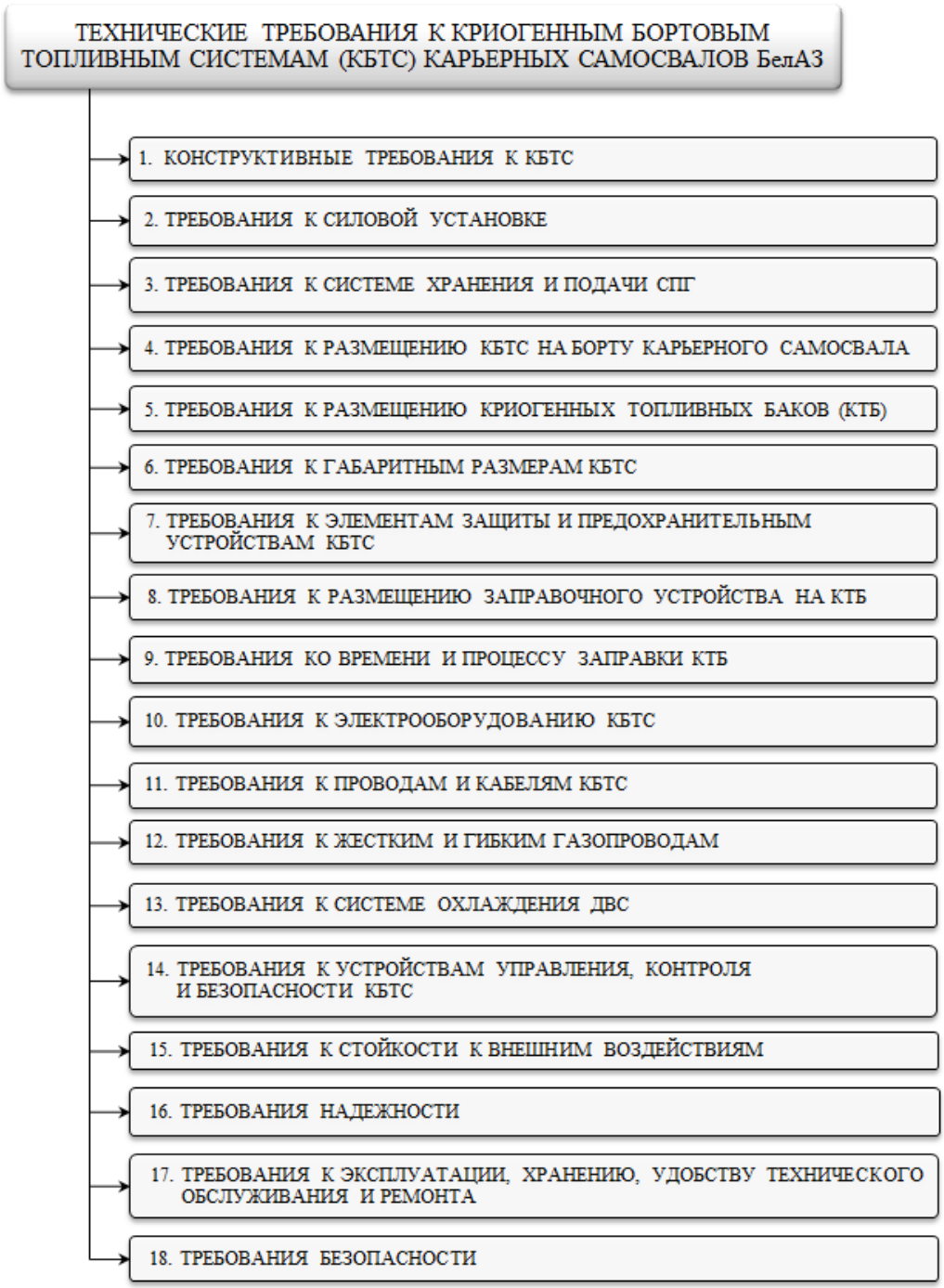

Рис. 5. Ключевые группы технических требований к КБТС газодизельных карьерных самосвалов БелАЗ
Fig. 5. Key groups of technical requirements for the KBFS of BelAZ gas-diesel quarry dump trucks

ством установки на борту самосвала криогенной бортовой топливной системы позволяет обеспечить стабильность и сохранность технических характеристик ДВС согласно его паспортным данным, заложенным заводом изготовителем.

2. Снижение пульсации газовой фазы метана посредством использования в криогенной бортовой топливной системе специализированного измерительного модуля с интегрированным в него демпфером-гасителем пульсации природного газа обеспечивает устойчивую работу дизельного двигателя внутреннего сгорания в газодизельном цикле эксплуатации. При этом предоставляется возможность ведения мониторинга расхода природного газа в процессе эксплуатации карьерного самосвала БелАЗ-75131 в газодизельном режиме.

3. Инновационное конструктивное решение испарителя, используемого в криогенной бортовой топливной системе, позволяет адаптивно осуществлять увеличение площади теплообмена его контура в зависимости от температуры окружающей среды (в периоды зимы, весны, лета, осени) и тем самым обеспечить стабильную и устойчивую расчетную подачу перегретого парообразного газа в дизельный двигатель внутреннего сгорания при его газодизельной эксплуатации.

4. Экономическая и экологическая эффективность использования криогенных бортовых топливных систем на тяжелых карьерных самосвалах БелАЗ для частичной замены дизельного топлива более дешевым и природосберегающим (более чистым) газовым подтверждена снижением финансовых затрат на моторное топливо, а также снижением техногенного воздействия на окружающую среду посредством оптимизации состава выхлопных газов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Хазин М. Л., Апакашев Р. А. Декарбонизация горной промышленности России // Известия Уральского государственного горного университета. 2023. № 2(70). С. 98–106. DOI: 10.21440/2307-2091-2023-2-98-106.

2. Акимов В. Н., Семикашев В. В., Савина Н. П. Механизмы влияния цен моторных топлив на российскую экономику // Научные труды: Институт народнохозяйственного прогнозирования РАН. 2024. Т. 22. № 4. С. 135–163. DOI: 10.47711/2076-3182-2024-4-135-163.

3. Pocard N. How proven fuel cell technology is decarbonizing mining and construction. 2021. URL: https: // blog. ballard.com/decarbonizing-mining-and-construction (дата обращения: 30.05.2026).

4. Хазин М. Л., Апакашев Р. А. Карьерные самосвалы на водородном топливе // Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал). 2022. № 1. С. 47–59. DOI: 10.25018 /0236-1493- 2022-1-0-47.

5. Луняшин П. Карьерные тяжеловесы: новые пути к совершенству (Ч. 1) // Основные средства. 2019. № 2. URL: https://os1.ru/article/19361-tendentsii-v-razvitii-sovremennyh-karernyh-samosvalov-na-jestkoy-rame-karernye-tyajelovesy-novye-puti-k-sovershenstvu-ch-1 (дата обращения: 30.05.2026).

6. Первый в мире тяжелый грузовик на топливных элементах Hyundai XCIENT Fuel Cell направляется в Европу для коммерческого использования. URL: https://www.hyundai-avtomir.ru/news/pervyj-v-mire-tyazhelyj-gruzovik-na-toplivnyh-ehlementah-hyundai-xcient-fuel-cell-napravlyaetsya-v-evropu-dlya-kommercheskogo-ispolzov aniya/ (дата обращения: 30.05.2026).

7. Anglo American построит крупнейший автомобиль на водородном топливе. URL: https://regnum.ru/news/it/2866425.html (дата обращения: 30.05.2026).

8. «КамАЗ» начнет разработку водородных грузовиков. URL: https://trans.ru/news/kamaz-nachnet-razrabotku-vodorodnih-gruzovikov-a-nuzhno-li-neftegazovoi-rossii-vodorodnoe-toplivo (дата обращения: 30.05.2026).

9. Компания БЕЛАЗ показала первый в мире водородный карьерный самосвал. [Электронный ресурс]. URL: https://igrader.ru/career/kompaniya-belaz-pokazala-pervyj-v-mire-vodorodnyj-karernyj-samosval/ (дата обращения: 30.05.2026).

10. БЕЛАЗ начинает разработку 220-тонного карьерного самосвала на водородном топливе. [Электронный ресурс]. URL: https://belta.by/economics/view/belaz-nachinaet-razrabotku-220-tonnogo-karjernogo-samosvala-na-vodorodnom-toplive-740257-2025/ (дата обращения: 30.05.2026).

11. Перспективные направления развития техники БЕЛАЗ. [Электронный ресурс]. URL: https://mining-digest.ru/belaz_new_directions.html (дата обращения: 31.05.2026).

12. БелАЗ тестирует карьерные самосвалы на электричестве, газе и водороде. [Электронный ресурс]. URL: https://www1.ru/news/2024/11/25/belaz-testiruet-karernye-samosvaly-na-elektricestve-gaze-i-vodorode.html (дата обращения: 31.05.2026).

13. Запасы нефти и газа. [Электронный ресурс]. URL: https://www.gazprom.ru/about/production/reserves/ (дата обращения: 31.05.2026).

14. Газовые самосвалы БЕЛАЗ // Горная промышленность. 2024. № 2. С. 14–15.

15. Дубов Г. М., Яцевич М. Ю., Якобсон Д. М., Бороненков Д. А. Особенности и перспективы использования сжиженного природного газа как газомоторного топлива на автотранспорте. // Маркшейдерия и недропользование. 2025. Т. 25. № 2. С. 41–52. DOI: 10.56195/20793332-2025-25-2-41-48.

16. БЕЛАЗ представил новый карьерный самосвал на выставке «Уголь России и Майнинг-2026» в Новокузнецке. [Электронный ресурс]. URL: https://soyuz.by/soyuznyy-biznes/belaz-predstavil-novyy-karernyy-samosval-na-vystavke-ugol-rossii-i-mayning-2026-v-novokuznecke (дата обращения: 04.06.2026).

17. Дубов Г. М., Кузнецов И. В., Кульпин А. Г., Нохрин С. А., Панченко К. В. Обоснование компоновочного решения по размещению криогенных топливных баков на палубе самосвала БЕЛАЗ-

75131. Статический расчет // Горное оборудование и электромеханика. 2025. № 3(179). С. 30–40. DOI: 10.26730/1816-4528-2025-3-30-40.

18. Дубов Г. М., Кульпин А. Г., Черниченко А. В., Нохрин С. А. Способ модернизации карьерного самосвала «БелАЗ-75306» для работы в газодизельном режиме // Маркшейдерия и недропользование. 2025. Т. 25. № 6. С. 52–58. DOI: 10.56195/20793332-2025-25-6-52-58.

19. Дубов Г. М., Яцевич М. Ю., Бороненков Д. А., Якобсон Д. М. Опыт использования сжиженного природного газа как газомоторного топлива на технологическом транспорте // Маркшейдерия и недропользование. 2025. Т. 25. № 3. С. 73–81. DOI: 10.56195/20793332-2025-25-3-73-81.

20. Патент № 2701133. Российская Федерация, МПК B60K 15/07 (2006.01), F17C 13/08 (2006.01). Способ установки криогенных топливных баков на карьерном самосвале / Нохрин С. А., Дубов Г. М., Трухманов Д. С.; заявитель и патентообладатель Общество с ограниченной ответственностью «Сибирь-Энерго» (ООО «Сибирь-Энерго»). № 2019103118; заявл. 04.02.2019; опубл. 24.09.2019. 14 с.

21. Патент № 2794478 C1. Российская Федерация, МПК B60K 15/07. Способ установки криогенного топливного бака на карьерном самосвале / Дробин И. А., Нохрин С. А., Дубов Г. М., Трухманов Д. С., Чегошев А. А., Черниченко А. В., Амосов А. А.; заявитель и патентообладатель Общество с ограниченной ответственностью «ТехноЭко» (ООО «ТехноЭко»). № 2022133441; заявл. 19.12.2022; опубл. 19.04.2023. 16 с.

22. Патент № 2856533. Российская Федерация, МПК F02M 21/02 (2006.01), F02M 21/06 (2006.01), F02M 37/00 (2006.01). Криогенная бортовая топливная система карьерных самосвалов / Дубов Г. М., Нохрин С. А., Богомолов А. Р., Турушев С. В., Черниченко А. В., Шарифуллин М. К.; патентообладатель Дубов Г. М., Нохрин С. А., Богомолов А. Р. № 2025114025; заявл. 23.05.2025; опубл. 24.02.2026. 10 с.

23. Нохрин С. А., Ельцов И. Е., Чегошев А. А. Реконструкция палубы карьерного самосвала БелАЗ 75131 для обеспечения его эксплуатации в газодизельном режиме // Инновации в машиностроении (ИнМаш-2021): Сборник трудов XII Международной научно-практической конференции, посвященной памяти доктора технических наук, профессора Рахимянова Хариса Магсумановича, Новосибирск, 07–09 октября 2021 года / Под ред. С. И. Василевской, Ю. С. Кудрявцевой. Новосибирск : Новосибирский государственный технический университет, 2021. С. 303–310.

24. Ельцов И. Е., Чегошев А. А., Нохрин С. А. Анализ криогенных бортовых топливных систем и теплообменных аппаратов, обеспечивающих двухтопливный (газодизельный) режим эксплуатации карьерных самосвалов // Инновации в машиностроении (ИнМаш-2021): Сборник трудов XII Международной научно-практической конференции, посвященной памяти доктора технических наук, профессора Рахимянова Хариса Магсумановича, Новосибирск, 07–09 октября 2021 года / Под ред. С. И. Василевской, Ю. С. Кудрявцевой. Новосибирск : Новосибирский государственный технический университет, 2021. С. 295–302.

© 2026 Авторы. Эта статья доступна по лицензии CreativeCommons «Attribution» («Атрибуция») 4.0 Всемирная (https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/)

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Об авторах:

Дубов Георгий Михайлович, кандидат технических наук, доцент кафедры горных машин и комплексов, Кузбасский государственный технический университет имени Т. Ф. Горбачева (Россия, 650000, г. Кемерово, ул. Весенняя, 28), ORCID: https://orcid.org/0000-0001-5383-8884, e-mail: nikokem@mail.ru

Нохрин Сергей Алексеевич, заместитель генерального директора, общество с ограниченной ответственностью «ТехноЭКО» (Россия, 653046, г. Прокопьевск, ул. Азовская, 11), e-mail: nsa500@mail.ru

Данил Александрович Бороненков, аспирант, Кузбасский государственный технический университет имени Т. Ф. Горбачева (Россия, 650000, г. Кемерово, ул. Весенняя, 28), e-mail: danil.boronenkov@inbox.ru

Даниил Максимович Якобсон, аспирант, Кузбасский государственный технический университет имени Т. Ф. Горбачева (Россия, 650000, г. Кемерово, ул. Весенняя, 28), e-mail: daneel3000@gmail.com

Заявленный вклад авторов:

Дубов Георгий Михайлович – научный менеджмент, концептуализация исследования, выводы.
Нохрин Сергей Алексеевич – написание текста.
Данил Александрович Бороненков – обработка результатов.
Даниил Максимович Якобсон – обзор литературы, сбор и анализ данных.

Все авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.

Original article

DOI: 10.26730/1816-4528-2026-4-93-103

Georgiy M. Dubov[1*], Sergey A. Nokhrin[2], Danil A. Boronenkov [1], Daniil M. Yakobson[1]

[1] T.F. Gorbachev Kuzbass State Technical University
[2] «TekhnoEco» LLC

***** for correspondence: nikokem@mail.ru

CRYOGENIC ON-BOARD FUEL SYSTEM BELAZ GAS-DIESEL QUARRY DUMP TRUCKS

Article info
Received:
12 June 2026

Accepted for publication:
01 September 2026

Accepted:
15 September 2026

Keywords: *BelAZ quarry dump truck, cryogenic on-board fuel system, gas-diesel operating mode, gas motor fuel, liquefied natural gas, methane*

Abstract.
In the face of persistent sanctions and fierce market competition, the domestic mining industry, particularly its coal segment, faces the pressing need to reduce operating costs. Optimizing the fuel and energy costs consumed by open-pit trucks during the transportation of overburden and minerals has been recognized as one of the most effective ways to minimize the cost of open-pit mining. This paper analyzes currently implemented innovative projects aimed at diversifying the petroleum (diesel) fuel used in trucks, particularly BelAZ open-pit trucks. Examples include recent innovative projects by BelAZ OJSC to develop open-pit trucks powered by cheaper and cleaner fuels: hydrogen, electricity, and liquefied natural gas. It is noted that one of the successful examples of implementing this strategy in Kuzbass is a large-scale project to modernize the BelAZ fleet of dump trucks. By integrating cryogenic on-board fuel systems into heavy-duty mining dump trucks, they are being converted to dual-fuel (gas-diesel) operation, in which liquefied natural gas serves as a cost-effective alternative, partially replacing traditional diesel fuel. This paper focuses on the components and operating principles of the innovative cryogenic on-board fuel system installed on heavy-duty BelAZ gas-diesel mining dump trucks. Key technical requirements for the cryogenic on-board fuel system are presented, enabling partial substitution (30 to 50%) of diesel fuel with natural gas during operation of BelAZ dump trucks.

For citation: Dubov G.M., Nokhrin S.A., Boronenkov D.A., Yakobson D.M. Cryogenic on-board fuel system BeLAZ gas-diesel quarry dump trucks. Mining Equipment and Electromechanics, 2026; 4(186):93-103 (In Russ., abstract in Eng.). DOI: 10.26730/1816-4528-2026-4-93-103, EDN: ZECMXC

REFERENCES

1. Khazin M.L., Apakashev R.A. Decarburization of the mining industry of Russia. *Bulletin of the Ural State Mining University.* 2023; 2(70):98-106. DOI: 10.21440/2307-2091-2023-2-98-106.

2. Akimov V.N., Semikashev V.V., Savina N.P. Mechanisms of influence of motor fuel prices on the Russian economy. *Scientific works: Institute of Economic Forecasting of the Russian Academy of Sciences.* 2024; 22(4):135–163. DOI: 10.47711/2076-3182-2024-4-135-163.

3. Pocard N. How proven fuel cell technology is decarbonizing mining and construction. 2021. URL: https: // blog. ballard.com/decarbonizing-mining-and-construction (date of access: 30.05.2026).

4. Khazin M.L., Apakashev R.A. Quarry dump trucks on hydrogen fuel. *Mining information and analytical bulletin (scientific and technical journal).* 2022; 1:47-59. DOI: 10.25018 / 0236-1493- 2022-1-0-47.

5. Lunyashin P. Career heavyweights: new paths to excellence (Part 1). *Fixed Assets.* 2019; 2. /URL: https://os1.ru/article/19361-tendentsii-v-razvitii-sovremennyh-karernyh-samosvalov-na-jestkoy-rame-karernye-tyajelovesy-novye-puti-k-sovershenstvu-ch-1 (date of access: 30.05.2026).

6. The world's first heavy-duty fuel cell truck, the Hyundai XCIENT Fuel Cell, is heading to Europe for commercial use. URL: https://www.hyundai-avtomir.ru/news/pervyj-v-mire-tyazhelyj-gruzovik-na-toplivnyh-ehlementah-hyundai-xcient-fuel-cell-napravlyaetsya-v-evropu-dlya-kommercheskogo-ispolzov aniya/ (date of access: 30.05.2026).

7. Anglo American to build world's largest hydrogen-powered car. URL: https://regnum.ru/news/it/2866425.html (date of access: 30.05.2026).

8. KAMAZ to begin developing hydrogen trucks. URL: https://trans.ru/news/kamaz-nachnet-razrabotku-vodorodnih-gruzovikov-a-nuzhno-li-neftegazovoi-rossii-vodorodnoe-toplivo (date of access: 30.05.2026).

9. BELAZ unveiled the world's first hydrogen-powered mining dump truck. [Electronic resource].

URL: https://igrader.ru/career/kompaniya-belaz-pokazala-pervyj-v-mire-vodorodnyj-karernyj-samosval/ (date of access: 30.05.2026).

10. BELAZ begins development of a 220-ton hydrogen-powered quarry dump truck. [Electronic resource]. URL: https://belta.by/economics/view/belaz-nachinaet-razrabotku-220-tonnogo-karjernogo-samosvala-na-vodorodnom toplive-740257-2025/ (date of access: 30.05.2026).

11. Promising directions for the development of BELAZ equipment. [Electronic resource]. URL: https://mining-digest.ru/belaz_new_directions.html (date of access: 31.05.2026).

12. BelAZ tests quarry dump trucks powered by electricity, gas, and hydrogen. [Electronic resource]. URL: https:// www1.ru/news/2024/11/25/belaz-testiruet-karernye-samosvaly-na-elektricestve-gaze-i-vodorode.html (date of access: 31.05.2026).

13. Oil and gas reserves. [Electronic resource]. URL: https://www.gazprom.ru/about/production/reserves/ (date of access: 31.05.2026).

14. BELAZ gas dump trucks. *Mining industry.* 2024; 2:14-15.

15. Dubov G.M., Yatsevich M.Yu., Yakobson D.M., Boronenkov D.A. Features and prospects of using liquefied natural gas as a gas motor fuel in motor transport. *Mine surveying and subsoil use.* 2025; 25(2):41-52. DOI: 10.56195/20793332-2025-25-2-41-48.

16. BELAZ presented a new mining dump truck at the Coal of Russia and Mining 2026 exhibition in Novokuznetsk. [Electronic resource]. URL: https://soyuz.by/soyuznyy-biznes/belaz-predstavil-novyy-karernyy-samosval-na-vystavke-ugol-rossii-i-mayning-2026-v-novokuznecke (date of access: 04.06.2026).

17. Dubov G.M., Kuznetsov I.V., Kulpin A.G., Nokhrin S.A., Panchenko K.V. Justification of the layout solution for the placement of cryogenic fuel tanks on the deck of the BELAZ-75131 dump truck. Static calculation. *Mining equipment and electromechanics.* 2025; 3(179):30-40. DOI: 10.26730/1816-4528-2025-3-30-40.

18. Dubov G.M., Kulpin A.G., Chernichenko A.V., Nokhrin S.A. Method of modernization of the BelAZ-75306 quarry dump truck for operation in gas-diesel mode. *Mine surveying and subsoil use.* 2025; 25(6):52-58. DOI: 10.56195/20793332-2025-25-6-52-58.

19. Dubov G.M., Yatsevich M.Yu., Boronenkov D.A., Yakobson D.M. Experience of using liquefied natural gas as a gas motor fuel in technological transport. *Mine surveying and subsoil use.* 2025; 25(3):73-81. DOI: 10.56195/20793332-2025-25-3-73-81.

20. Patent № 2701133. Russian Federation, MPK B60K 15/07 (2006.01), F17C 13/08 (2006.01). Method for installing cryogenic fuel tanks on a quarry dump truck/ Nokhrin S.A., Dubov G.M., Trukhmanov D.S.; applicant and patent holder Limited Liability Company "Sibir-Energo" (OOO "Sibir-Energo"). № 2019103118; avt. 04.02.2019; published 24.09.2019. 14 p.

21. Patent № 2794478. Russian Federation, MPK B60K 15/07 (2006.01). Method of installation of cryogenic fuel tank on a quarry dump truck/ Drobin I.V., Nokhrin S.A., Dubov G.M., Trukhmanov D.S., Chegoshev A.A., Chernichenko A.V., Amosov A.A.; applicant Limited Liability Company «TechnoEco». № 2022133441; avt. 19.12.2022; published 19.04.2023. 16 p.

22. Patent № 2856533. Russian Federation, IPC F02M 21/02 (2006.01), F02M 21/06 (2006.01), F02M 37/00 (2006.01). Cryogenic on-board fuel system for mining dump trucks /Dubov G.M., Nokhrin S.A., Bogomolov A.R., Turushev S.V., Chernichenko A.V., Sharifullin M.K.; patent holder Dubov G.M., Nokhrin S.A., Bogomolov A.R. № 2025114025; application. 05.23.2025; published. 02.24.2026. 10 p.

23. Nokhrin S.A., Yeltsov I.E., Chegoshev A.A. Reconstruction of the deck of the BelAZ 75131 mining dump truck to ensure its operation in gas-diesel mode. *Innovations in Mechanical Engineering (InMash-2021): Collection of works of the XII International scientific and practical conference dedicated to the memory of Doctor of Technical Sciences, Professor Kharis Magsumanovich Rakhimyanov.* Novosibirsk, October 7–9, 2021. Edited by S.I. Vasilevskaya, Yu.S. Kudryavtseva, Novosibirsk: Novosibirsk State Technical University; 2021. Pp. 303-310.

24. Eltsov I.E., Chegoshev A.A., Nokhrin S.A. Analysis of cryogenic on-board fuel systems and heat exchangers providing dual-fuel (gas-diesel) operation mode of quarry dump trucks. *Innovations in Mechanical Engineering (InMash-2021): Collection of papers of the XII International scientific and practical conference dedicated to the memory of Doctor of Technical Sciences, Professor Kharis Magsumanovich Rakhimyanov.* Novosibirsk, October 7–9, 2021. Edited by S.I. Vasilevskaya, Yu.S. Kudryavtseva, Novosibirsk: Novosibirsk State Technical University; 2021. Pp. 295-302.

© 2026 The Authors. This is an open access article under the CC BY license (http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/).

The authors declare no conflict of interest.

About the author:
Georgiy M. Dubov, C. Sc. in Engineering, Associate Professor of the Department of Mining Machines and Complexes, T.F. Gorbachev Kuzbass State Technical University (28, Vesennyaya St., Kemerovo, 650000, Russian Federation), ORCID: https://orcid.org/0000-0001-5383-8884, e-mail: nikokem@mail.ru
Sergey A. Nokhrin, Deputy General Director, TechnoEKO Limited Liability Company (11 Azovskaya St., Prokopyevsk, 653046, Russian Federation), e-mail: nsa500@mail.ru
Danil A. Boronenkov, Post-graduate Student, T.F. Gorbachev Kuzbass State Technical University (28, Vesennyaya St., Kemerovo, 650000, Russian Federation), e-mail: danil.boronenkov@inbox.ru
Daniil M. Yakobson, Post-graduate Student, T.F. Gorbachev Kuzbass State Technical University (28, Vesennyaya St., Kemerovo, 650000, Russian Federation), e-mail: daneel3000@gmail.com

Contribution of the authors:
Georgiy M. Dubov – scientific management, conceptualization of research and calculations, conclusions.
Sergey A. Nokhrin – calculations, writing the text.
Danil A. Boronenkov – processing of the results.
Daniil M. Yakobson – literature review, data collection and analysis.

Authors have read and approved the final manuscript.