

СЖИЖЕННЫЙ ПРИРОДНЫЙ ГАЗ, КАК ПЕРСПЕКТИВНЫЙ ВИД МОТОРНОГО ТОПЛИВА ДЛЯ КАРЬЕРНЫХ САМОСВАЛОВ

Дубов Г.М.¹, Нохрин С.А.², Ходоровский С.К.³, Черниченко А.В.¹

¹Кузбасский государственный технический университет имени Т.Ф. Горбачева, Кемерово;

²Общество с ограниченной ответственностью «ТехноЭко», Прокопьевск;

³Общество с ограниченной ответственностью «КАМСС», Новокузнецкий район, п.ст. Тальжино

Ключевые слова: газомоторное топливо, сжиженный природный газ, карьерные самосвалы БелАЗ, криогенная бортовая топливная система, эколого-экономическая эффективность транспортировки горной массы.

Аннотация. Представлен опыт реализации в Кузбассе интегрированного проекта по использованию природного газа в качестве моторного топлива на карьерных самосвалах БелАЗ. Описана хронология реализации проекта и полученные результаты по модернизации карьерных самосвалов БелАЗ для обеспечения их эксплуатации, как в газовом, так и в газодизельном режимах. Приведены данные по экономической и экологической эффективности использования сжиженного природного газа в качестве моторного топлива на газодизельных карьерных самосвалах БелАЗ. Рассмотрены разработки ученых КузГТУ в рамках реализации проекта. Представлена энергетическая оценка эксплуатации газодизельных карьерных самосвалов БелАЗ 75131, оснащенных криогенной бортовой топливной системой. Отражены данные по исследованиям температурных характеристик дизельного двигателя газодизельного карьерного самосвала БелАЗ 75131, подтверждающие технологическую возможность и перспективность модернизации классических дизельных карьерных самосвалов БелАЗ для работы в газодизельном режиме. Утверждается, что полученные при реализации проекта компетенции и результаты позволят применять полученный уникальный опыт в других Российских горнодобывающих компаниях, осуществляющих добычу минеральных ресурсов.

LIQUEFIED NATURAL GAS AS A PROMISING TYPE OF MOTOR FUEL FOR MINING DUMP TRUCKS

Dubov G.M.¹, Nokhrin S.A.², Khodorovsky S.K.³, Chernichenko A.V.¹

¹T.F. Gorbachev Kuzbass State Technical University, Kemerovo;

²«TekhnoEco» Limited Liability Company, Prokopyevsk;

³«KAMSS», Limited Liability Company, Novokuznetsk district, v.st. Talzhino

Keywords: natural gas motor fuel, liquefied natural gas, BelAZ mining dump trucks, cryogenic on-board fuel system, eco-economic efficiency of rock mass haulage.

Abstract. The experience of implementing an integrated project on the use of natural gas as motor fuel for BelAZ mining dump trucks in Kuzbass is presented. The chronology of the project implementation and the results obtained from the modernization of BelAZ mining dump trucks to ensure their both gas and gas-diesel operations are described. Data on the economic and environmental efficiency of using liquefied natural gas as a motor fuel for BelAZ gas-diesel mining dump trucks are provided. The works of KuzSTU scientists within the framework of the project are considered. An energy assessment of the operation of BelAZ 75131 gas-diesel mining dump trucks equipped with a cryogenic on-board fuel system is presented. Data on studies of the temperature characteristics of the diesel engine of BelAZ 75131 gas-diesel mining dump truck are described, confirming the feasibility and prospects of converting classic diesel-fuelled BelAZ mining dump trucks to gas-diesel operation. It is argued that the competencies and results obtained during the implementation of the project will make it possible to apply the unique experience gained in other Russian mining companies engaged in the extraction of mineral resources.

Введение

Как известно, добыча полезных ископаемых открытым способом сопряжена с колоссальными затратами на транспортировку горной массы, связанную, прежде всего, с затратами на энергоносители, а именно топливо для карьерной техники. В свою очередь повышение эффективности разработки месторождений в значительной мере зависит, как от

применяемого для перевозки горной массы вида транспорта, выбор которого определяется горно-геологическими условиями его эксплуатации, так и доступности тех или иных энергоносителей в местах дислокации горнодобывающих предприятий [1-5].

Учитывая данное обстоятельство, в Кузбассе начиная с 2015 года запущен инновационный интегрированный проект, связанный с повышением эколого-экономической эффективности транспортировки горной массы позволяющий снизить себестоимость добычи ключевого минерального ресурса Кузбасса – угля [6].

Интегрированный проект по использованию природного газа в качестве моторного топлива на карьерных самосвалах БелАЗ был запущен и реализуется в настоящее время тремя компаниями, а именно: компанией «Сибирь-Энерго» – производителем и поставщиком газомоторного топлива – сжиженного природного газа; компанией «ТехноЭко» разработчиком и интегратором криогенных бортовых топливных систем для использования сжиженного природного газа (СПГ) в качестве моторного топлива на карьерной технике; автотранспортным предприятием «Автоколонна 2015» – эксплуатирующее крупнотоннажную карьерную технику, оснащенную криогенными бортовыми топливными системами, работающими, как на совмещении газового и дизельного топлива, так и исключительно на сжиженном природном газе.

Реализация проекта, осуществляется при непосредственном участии и взаимодействии с ключевым партнером ОАО «БЕЛАЗ, управляющая компания холдинга «БЕЛАЗ-ХОЛДИНГ». Сервисная и гарантийная поддержка проекта осуществляется ООО «КАМСС» – ведущим российским производственно-сервисным предприятием. Научное и инженерное сопровождение ряда задач, решаемых в рамках реализации проекта, осуществляется учеными кафедры «Горные машины и комплексы» и кафедры «Теплоэнергетики» КузГТУ (Кузбасского государственного технического университета имени Т.Ф. Горбачева) [7].

Результаты

На первоначальном этапе запуска проекта в России практически отсутствовали действующие производители оборудования для сжижения природного газа, способные комплексно и в разумные сроки спроектировать, изготовить и поставить необходимое технологическое оборудование. Поэтому собственниками было принято решение о приобретении в Китае технологического оборудования для строительства малотоннажного завода в г. Новокузнецке, Кемеровской области.

Строительство завода по производству СПГ производительностью 1,5 тонны в час работающего по технологии сжижения с использованием одного смешанного хладагента было запущено во второй половине 2015 года (рис. 1). И уже в начале 2017 года компанией «Сибирь-Энерго» получен первый за Уралом сжиженный природный газ предназначенный для использования в качестве газомоторного топлива.



Рис. 1. Завод по производству сжиженного природного газа (Россия, г. Новокузнецк, ООО «Сибирь-Энерго»)

Параллельно со строительством и вводом в эксплуатацию завода был начат длительный и сложный этап разработки инновационной криогенной бортовой топливной системы позволяющей осуществлять эксплуатацию карьерных самосвалов БелАЗ, как в двухтопливном (газодизельном) режиме работы, так и в чисто дизельном режиме. Учеными КузГТУ был разработан, не имеющий на тот момент аналогов, технический проект по модернизации серийно выпускаемых карьерных самосвалов БелАЗ серии 75131, грузоподъемностью 130 тн для их эксплуатации с использованием в качестве моторного топлива сжиженного природного газа [8].

Результатом проделанной работы стало то, что по состоянию на ноябрь 2023 года находятся в промышленной эксплуатации более 60-ти 130-тонных газодизельных самосвалов БелАЗ 75131 (рис. 2), осуществляющих транспортировку горной массы с использованием в качестве частичного замещения дизельного топлива природный газ, с годовым его потреблением порядка 12 000 000 м³.



Рис. 2. Газодизельный карьерный самосвал БелАЗ 75131 (130 тн)

Используемая система хранения СПГ на борту самосвала, а именно криогенные топливные баки, используются Китайского производства. Основанием для этого послужил ряд критериев, а именно: цена-качество, сроки поставки, а также гибкость производителей в плане конструкторских решений. Необходимо отметить, что схемные и конструктивные решения по способам размещения криогенных топливных баков на борту карьерных самосвалов запатентованы [9-10].

Система регазификации (испарение газа) с последующей его подачей в двигатель является на 100% собственной разработкой компании «ТехноЭко». В качестве системы управления газодизельным (двухтопливным) режимом работы до недавнего времени использовалась система производства европейских партнеров. По известным причинам в 2022 году они ушли с Российского рынка, что мотивировало компанию «ТехноЭко» к разработке собственной импортозамещающей системы управления, с использованием на 90% отечественных комплектующих.

Проведенные учеными КузГТУ исследования экологической эффективности эксплуатации 130-тонных газодизельных самосвалов БелАЗ показали их преимущество по отношению к дизельным аналогам, которое заключается в снижении выбросов диоксида углерода CO₂ (углекислого газа) в диапазонах 5-10% (рис. 2) и прочих канцерогенных составляющих, а также в снижении задымленности (загазованности) промышленных площадок горных выработок, что является достаточно актуальным критерием, особенно при эксплуатации карьерной техники при низких температурах в условиях Сибири [11].

Промышленная эксплуатация газодизельных 130-тонных самосвалов БелАЗ серии 75131 показала значительный экономический эффект при транспортировке горной массы. Это подтверждается достигнутым, порядка 30% процентов замещения дизельного топлива природным газом, в зависимости от горно-геологических условий их эксплуатации. Экономический эффект на разнице в стоимости дизельного топлива и газа, при данном проценте замещения, составляет только на одном 130-тонном газодизельном карьерном самосвале БелАЗ 75131 до 8 млн. рублей в год (данные по состоянию на октябрь 2023 года).

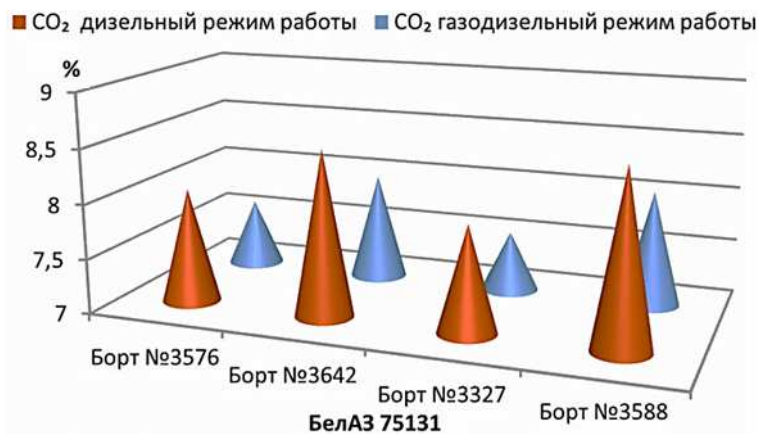


Рис. 2. Концентрации CO₂ в выхлопных газах при дизельном и газодизельном режимах работы карьерных самосвалов БелАЗ 75131

Положительные результаты промышленной эксплуатации газодизельных карьерных самосвалов способствовали запуску в 2021 году в серийное производство компанией ОАО «БЕЛАЗ, управляющая компания холдинга «БЕЛАЗ-ХОЛДИНГ», первых газодизельных карьерных самосвалов БелАЗ модели 75131С, оснащенных криогенной бортовой топливной системой.

Необходимо отметить, что успех в реализации интегрированного проекта, был сопряжен с созданием заправочной инфраструктуры для обеспечения газомоторным топливом карьерных самосвалов. В этой связи на участках горных выработок, вблизи технологических трасс, были построены 8 заправочных площадок (рис. 3), где посредством 4 криогенных мобильных автозаправщиков осуществляется наполнение сжиженным природным газом криогенных топливных баков (рис. 4) установленных на борту самосвалов.



Рис. 3. Газовая заправочная площадка для карьерных самосвалов



Рис. 4. Криогенные топливные баки, установленные на палубе газодизельного БелАЗ 75131

Такое технологическое решение по организации заправочных площадок позволяет оперативно изменять места их дислокации в зависимости от продвижения разрабатываемого угольного месторождения и сократить количество единиц заправочного оборудования.

Успешная реализации проекта по модернизации 130 тонных самосвалов БелАЗ и результаты их последующей эффективной эксплуатации, послужили поводом для запуска следующего инновационного проекта по модернизации уже 220 тонного карьерного самосвала БелАЗ серии 75306, для его работы по газодизельному циклу (рис. 5). На сегодняшний день опытный образец прошел предварительные полевые испытания, где показал ощутимые результаты в части экономической эффективности транспортировки горной массы.

Полученный с 2017 года положительный опыт эксплуатации газодизельных карьерных самосвалов, позволил в 2021 году совместно с ОАО «БЕЛАЗ», воплотить в жизнь еще один значимый проект, связанный с вводом в эксплуатацию 90 тонного карьерного самосвала серии 7558 Н (рис. 6), оснащенного чисто газовым двигателем внутреннего сгорания. На сегодня проведены его опытные промышленные испытания и до конца 2023 года должны

быть введены в эксплуатацию еще десять 90-тонных самосвалов. К этому же сроку в опытную промышленную эксплуатацию предполагается введение газового 130-тонного самосвала для оценки возможности его серийного запуска в производство на ОАО «БелАЗ».



Рис. 5. Газодизельный карьерный самосвал БелАЗ 75306 (220 т)



Рис. 6. Газовый карьерный самосвал БелАЗ 7558H (90 т)

Важным фактором промышленной эксплуатации газомоторной карьерной техники являлась её безопасность, которая обеспечивается в данном случае специализированной системой контроля загазованности на борту транспортного средства. Основное её назначение заключается в идентификации утечки газа из ключевых узлов криогенной бортовой топливной системы. Контроль и идентификация возможной аварийной утечки осуществляется посредством датчиков, размещаемых в местах, где возможна предполагаемая утечка. Так, к примеру, на борту газодизельного карьерного самосвала БелАЗ 75131 датчики контроля аварийной утечки газа установлены: под палубой карьерного самосвала в месте размещения испарителя (преобразователя сжиженного природного газа из жидкого состояния в газообразное) (рис. 8); на кассете включающей криогенные топливные баки (КТБ) и размещенной на палубе карьерного самосвала (рис. 9); в кабине водителя устанавливается датчик 1 совместно с блоком индикации утечки газа 2 (рис. 10) [12].



Рис. 8. Датчик в месте размещения испарителя

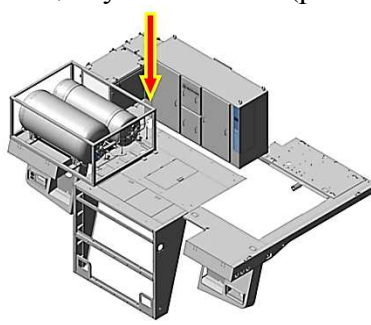


Рис. 9. Датчик на кассете с КТБ

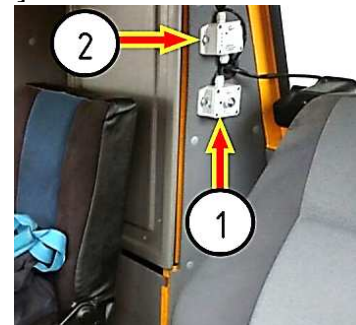


Рис. 10. Датчик 1 с блоком индикации 2 в кабине водителя

В ходе реализации проекта учеными КузГТУ разработаны технические требования к криогенным бортовым топливным системам (КБТС) карьерных самосвалов (рис. 11) и комплект эксплуатационных документов на неё [13].

Специалистами КузГТУ также были предложены технические решения по утилизации тяжелых углеводородов, образующихся в процессе сжижения природного газа в условиях ООО «СибирьЭнерго». Результатом проделанной работы стало повышение качества газомоторного топлива используемого на карьерном транспорте. Помимо этого разработан и создан измерительный комплекс, обеспечивающий стабильную подачу испаренного газа в цилиндры двигателя самосвала, гарантируя тем самым устойчивый режим его работы (рис. 12) [14].

Методика оценки технико-экономических показателей криогенной бортовой топливной системы, разработанная учеными КузГТУ совместно со специалистами производителями, позволила в процессе эксплуатации газодизельных карьерных самосвалов полноценно провести оценку эффективности эксплуатации на участках горных выработок [15, 16].

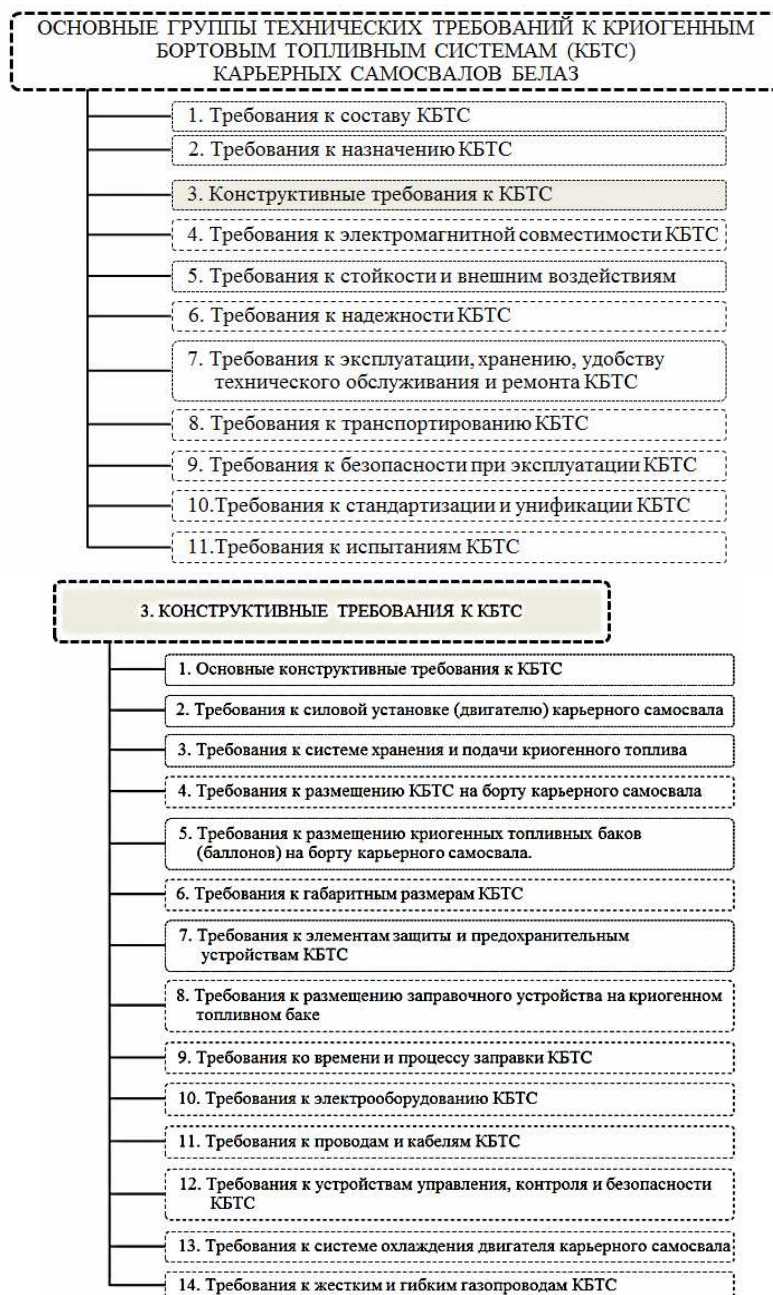


Рис. 11. Технические требования к криогенным бортовым топливным системам карьерных самосвалов БелАЗ

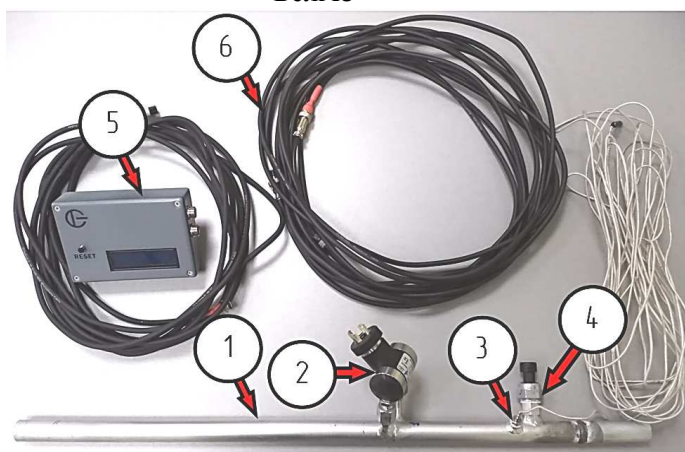


Рис. 12. Измерительный комплекс: 1 – расходомер диафрагменного типа; 2 – датчик дифференциального давления; 3 – термопара; 4 – датчик давления; 5 – электронный блок с дисплеем; 6 – соединительный кабель

Результаты проведенных полевых исследований температурных характеристик двигателя CUMMINS KTA 50 газодизельного карьерного самосвала БелАЗ 75131 подтвердили технологическую возможность и эффективность модернизации классических дизельных карьерных самосвалов БелАЗ 75131 для работы в газодизельном режиме. Графики, представленные на рисунках 13 и 14, говорят о том, что при эксплуатации карьерного самосвала БелАЗ 75131, оснащенного дизельным двигателем CUMMINS KTA 50 существует некоторый разброс амплитуд и нестабильность температур в цилиндрах двигателя при его эксплуатации в дизельном режиме.

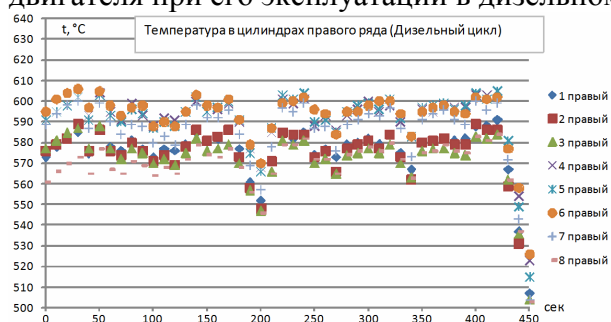


Рис. 13. Температура в цилиндрах двигателя CUMMINS KTA 50 при дизельном цикле работы

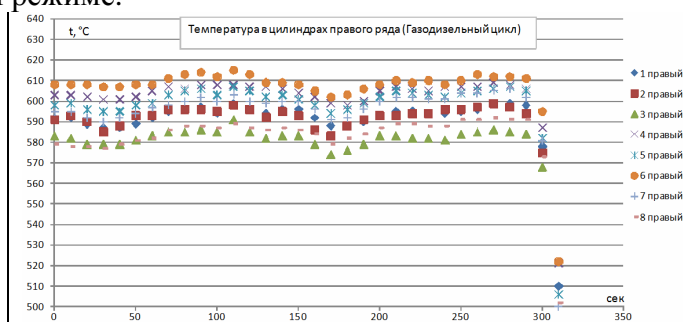


Рис. 14. Температура в цилиндрах двигателя CUMMINS KTA 50 при газодизельном цикле работы

При эксплуатации же на газодизельной смеси разброс амплитуд температур, по каждому цилиндру двигателя CUMMINS KTA 50, более равномерный. Это подтверждает тот факт, что использование природного газа в качестве частичного замещения дизельного топлива приводит к стабилизации температурного режима в камерах сгорания цилиндров двигателя [17-18].

Проведенная энергетическая оценка эксплуатации газодизельных карьерных самосвалов БелАЗ 75131, оснащенных криогенной бортовой топливной системой (КБТС), показала что удельные затраты энергии на транспортировку горной массы на 15-20% ниже, чем классическими самосвалами БелАЗ 75131 использующими в качестве моторного топлива только дизельное топливо (рис. 15) [19].

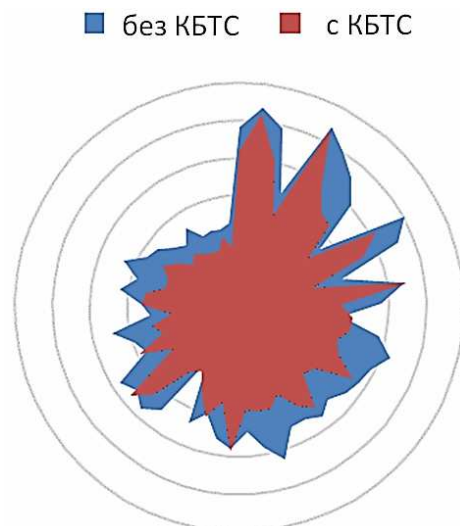


Рис. 15. Распределение удельных затрат энергии карьерными самосвалами БелАЗ 75131 оснащенными КБТС и без неё

Заключение

Успешно реализованный интегрированный проект является первым в Российской Федерации своего рода проектом, где полноценно была достигнута уникальная цель по использованию в промышленных масштабах в качестве моторного топлива на карьерной технике альтернативного вида энергоносителя сжиженного природного газа. Полученный колоссальный опыт реализации данного интегрированного проекта будет способствовать дальнейшему расширению рынка газомоторного топлива в части трансформации полученных инновационных технических решений на другие виды карьерной техники. Также полученные при его реализации компетенции и результаты позволят применять данный уникальный опыт и в других Российских горнодобывающих компаниях, осуществляющих добычу минеральных ресурсов. Так как необходимость в реализации подобного рода проектов обусловлена последними поручениям Президента России Владимира Владимировича Путина, сделанные в начале 2023 года в части расширения работы по развитию рынка газомоторного топлива в Российской Федерации.

Список литературы

1. Хазин М.Л. Перевод карьерных самосвалов на газ в условиях севера // Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. Геология. Нефтегазовое и горное дело – 2019. – Т. 19, №1. – С. 56-72. – doi.org/10.15593/2224-9923/2019.1.5.
2. Хазин М.Л., Тарасов А.П. Эколого-экономическая оценка карьерных троллейбусов // Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. Геология. Нефтегазовое и горное дело – 2018. – Т. 17, №2. – С. 166-180. – doi.org/10.15593/2224-9923/2018.2.6.
3. Тарасов П.И., Хазин М.Л., Фурзиков В.В.. Факторы, предопределяющие выбор энергоносителя для силовых агрегатов горной и транспортной техники карьеров Якутии // Горная Промышленность. – 2017. – №3. – С. 56-59.
4. Дубов Г.М., Нохрин С.А., Ходоровский С.К., Стрельников П.А., Черниченко А.В. Исследование предела среднеэксплуатационного замещения дизельного топлива газовым для оценки возможной перспективы использования СПГ в качестве моторного топлива для карьерных самосвалов БЕЛАЗ // Горное оборудование и электромеханика. – 2023. – № 3(167). – С. 59-66. – doi.org/10.26730/1816-4528-2023-3-59-66.
5. Тарасов П.И., Хазин М.Л., Фурзиков В.В. Повышение ресурса карьерных самосвалов // Горная промышленность. – 2019 – №6. – С.118-122.
6. Сергель А.Н. Карьерные самосвалы БелАЗ на газовом топливе // Горная промышленность. – 2019. – № 5(147). – С. 29-31.
7. Ельцов И.Е., Нохрин С.А. Анализ криогенных бортовых топливных систем обеспечивающих двухтопливный (газодизельный) режим работы карьерных самосвалов // Россия молодая: Сборник материалов XIII Всероссийской научно-практической конференции с международным участием. – Кемерово: КузГТУ, 2021. – С. 103031-103036.
8. Чегошев А.А., Нохрин С.А., Ельцов И.Е. Сжиженный природный газ, как альтернатива дизельному (нефтяному) топливу для карьерных самосвалов БелАЗ // Инновации в машиностроении: Сборник трудов XII Международной научно-практической конференции. – Новосибирск: НГТУ, 2021. – С. 311-318.
9. Патент №2701133 РФ. Способ установки криогенных топливных баков на карьерном самосвале / С.А. Нохрин, Г.М. Дубов, Д.С. Трухманов. – Заявка №2019103118 от 04.02.2019; опубл. 24.09.19, Бюл. №27.
10. Патент №2794478 РФ. Способ установки криогенного топливного бака на карьерном самосвале / И.А. Дробин, С.А. Нохрин, Г.М. Дубов, Д.С. Трухманов, А.А. Чегошев, А.В. Черниченко, А.А. Амосов. – Заявка № 2022133441 от 19.12.2022; опубл. 19.04.2023, Бюл. №11.
11. Bogomolov A.R., Dubov G.M., Azikhanov S.S. Comparative analysis of the concentration of CO₂, CO, CH₄, and O₂ in the exhaust gases of BelAZ dump trucks that use liquefied natural gas as a motor fuel // Nexo Scientific Journal. 2022, vol. 35, no. 2, pp. 552-565. doi.org/10.5377/nexo.v35i02.14634.
12. Дубов Г.М., Нохрин С.А., Аксенова О.Ю. Штоцкая А.А., Ельцов И.Е. Обеспечение безопасной эксплуатации газодизельных карьерных самосвалов БЕЛАЗ 75131 и БЕЛАЗ 75306 использующих в качестве моторного топлива сжиженный природный газ – метан // Вестник научного центра по безопасности работ в угольной промышленности. – 2022. – № 1. – С. 83-90.
13. Дубов Г.М., Трухманов Д.С., Чегошев А.А., Нохрин С.А., Ельцов И.Е. Разработка технических требований к криогенным бортовым топливным системам карьерных самосвалов БЕЛАЗ // Горное оборудование и электромеханика. – 2021. – № 6(158). – С. 49-58. – doi.org/10.26730/1816-4528-2021-6-49-58.
14. Azikhanov S.S., Bogomolov A.R., Dubov G.M., Nohrin S.A. Development of the instrumentation system for gas-and-diesel fuelled BelAZ dump truck X International Scientific and Practical Conference // MATEC Web of Conferences. 2019, vol. 297, p. 03001. doi.org/10.1051/mateconf/201929703001.
15. Трухманов Д.С., Дубов Г.М., Чегошев А.А., Ельцов И.Е., Нохрин С.А. Методология оценки технико-экономических показателей криогенных бортовых топливных систем карьерных самосвалов БелАЗ, потребляющих в качестве моторного топлива СПГ // Горное оборудование и электромеханика. – 2021. – №3. – С. 32-38. – doi.org/10.26730/1816-4528-2021-3-32-38.
16. Dubov G.M., Trukhmanov D.S., Kuznetsov I.V., Nokhrin S.A., Sergel A.N. Procedure for haul truck on-board LNG fuel systems performance evaluation // E3S Web of Conferences. 2019, vol. 105, p. 03019. doi.org/10.1051/e3sconf/201910503019.
17. Дубов Г.М., Богомоллов А.Р., Азиханов С.С., Григорьева Е.А., Нохрин С.А. Исследование расходных и температурных характеристик карьерных самосвалов БелАЗ 75131, работающих в газодизельном режиме // Горное оборудование и электромеханика. – 2021. – №3. – С. 20-31. – doi.org/10.26730/1816-4528-2021-3-20-31.
18. Dubov G.M., Bogomolov A.R., Azikhanov S.S., Strelnikov P.A., Nokhrin S.A. Temperature parameters in the combustion chambers of CUMMINS KTA-50 engines operating on various fuels under different fuel consumption rates // E3S Web of Conferences. 2021, vol. 315, p. 03011. doi.org/10.1051/e3sconf/202131503011.
19. Kuznetsov I.V., Panachev I.A., Dubov G.M., Nokhrin S.A. Energy assessment of BelAZ-75131 gas-diesel mining dump trucks operation at Kuzbass open casts // E3S Web of Conferences. 2020, vol. 174, p. 03010. doi.org/10.1051/e3sconf/202017403010.

References

1. Khazin M.L. Transfer of mining dump trucks to gas under the conditions of the north // Perm Journal of Petroleum and Mining Engineering. 2019, vol. 19, no. 1, pp. 56-72. doi.org/10.15593/2224-9923/2019.1.5.

2. Khazin M.L., Tarasov A.P. Ecological and economic evaluation of quarry trolley trucks // Perm Journal of Petroleum and Mining Engineering. 2018, vol. 17, no. 2. pp. 166-180. doi.org/10.15593/2224-9923/2018.2.6.
3. Tarasov P.I., Khazin M.L., Furzikov V.V. Factors that determine choice of the source of energy source of energy for power units of mining and transport equipment quarries in Yakutia // Mining Industry Journal. 2017, no. 3, pp. 56-59.
4. Dubov G.M., Nohrin S.A., Khodorovsky S.K., Strelnikov P.A., Chernichenko A.V. Study of the limit of average operational diesel fuel replacement with gas to assess the possible prospects for the use of LNG as motor fuel for BelAZ dump trucks. // Mining equipment and electromechanics. 2021, no. 3(167), pp. 59-66. doi.org/10.26730/1816-4528-2023-3-59-66.
5. Tarasov P.I., Khazin M.L., Furzikov V.V. Increasing the resource of quarry dump trucks // Mining Industry Journal. 2019, no. 6, pp. 118-122.
6. Sergel A.N. BelAZ quarry dump trucks on gas fuel // Mining Industry Journal. 2019, no. 5(147), pp. 29-31.
7. Eltsov I.E., Nohrin S.A. Analysis of cryogenic onboard fuel systems providing dual-fuel (gas-diesel) operation of dump trucks // Young Russia: Proceedings of XIII All-Russian Scientific-Practical Conference with international participation. – Kemerovo: KuzSTU, 2021. – P.103031-103036.
8. Chegoshhev A.A., Nohrin S.A., Eltsov I.E. Liquefied natural gas as an alternative to diesel (petroleum) fuel for BelAZ dump trucks // Innovations in mechanical engineering: Proceedings of the XII International Scientific and Practical Conference. – Novosibirsk: NSTU, 2021. – P. 311-318.
9. Patent No. 2701133 RU. Method of installation of cryogenic fuel tanks on a dump truck / S.A. Nohrin, G.M. Dubov, D.S. Trukhmanov. – Appl. No. 2019103118 from 04.02.2019; publ. 24.09.19, Bul. No. 27.
10. Patent No. 2794478 RU. Method of installation of cryogenic fuel tank on a dump truck / A.I. Drobin, S.A. Nohrin, G.M. Dubov, D.S. Trukhmanov, A.A. Chegoshhev, A.V. Chernichenko, A.A. Amosov. – Appl. No. 2022133441 from 19.12.2022; publ. 19.04.2023, Bul. No. 11.
11. Bogomolov A.R., Dubov G.M., Azikhanov S.S. Comparative analysis of the concentration of CO₂, CO, CH₄, and O₂ in the exhaust gases of BelAZ dump trucks that use liquefied natural gas as a motor fuel // Nexo Scientific Journal. 2022, vol. 35, no. 2, pp. 552-565. doi.org/10.5377/nexo.v35i02.14634.
12. Dubov G.M., Nohrin S.A., Aksenova O.Yu., Shtotskaya A.A., Eltsov I.E. Safe operation of gas-diesel BELAZ 75131 and BELAZ 75306 dump trucks using liquefied natural gas - methane as motor fuel // Bulletin of scientific center for work safety in coal industry. 2022, no. 1, pp. 83-90.
13. Dubov G.M., Trukhmanov D.S., Chegoshhev A.A., Nokhrin S.A., Eltsov I.E. Development of technical requirements for cryogenic on-board fuel systems of dump trucks BELAZ // Mining equipment and electromechanics. 2021, no. 6(158), pp. 49-58. doi.org/10.26730/1816-4528-2021-6-49-58.
14. Azikhanov S.S., Bogomolov A.R., Dubov G.M., Nohrin S.A. Development of the instrumentation system for gas-and-diesel fuelled BelAZ dump truck X International Scientific and Practical Conference // MATEC Web of Conferences. 2019, vol. 297, p. 03001. doi.org/10.1051/mateconf/201929703001.
15. Trukhmanov D.S., Dubov G.M., Chegoshhev A.A., Eltsov I.E., Nokhrin S.A. Technique for evaluating cost-performance ratio of on-board cryogenic fuel systems of LNG-fuelled Belaz mining dump trucks // Mining equipment and electromechanics. 2021, no. 3, pp. 32-38. doi.org/10.26730/1816-4528-2021-3-32-38.
16. Dubov G.M., Trukhmanov D.S., Kuznetsov I.V., Nokhrin S.A., Sergel A.N. Procedure for haul truck on-board LNG fuel systems performance evaluation // E3S Web of Conferences. 2019, vol. 105, p. 03019. doi.org/10.1051/e3sconf/201910503019.
17. Dubov G.M., Bogomolov A.R., Azikhanov S.S., Grigorieva E.A., Nohrin S.A. Study of fuel consumption and temperature characteristics of gas-diesel Belaz 75131 dump trucks // Mining equipment and electromechanics. 2021, no. 3, pp. 20-31. doi.org/10.26730/1816-4528-2021-3-20-31.
18. Dubov G.M., Bogomolov A.R., Azikhanov S.S., Strelnikov P.A., Nokhrin S.A. Temperature parameters in the combustion chambers of CUMMINS KTA-50 engines operating on various fuels under different fuel consumption rates // E3S Web of Conferences. 2021, vol. 315, p. 03011. doi.org/10.1051/e3sconf/202131503011.
19. Kuznetsov I.V., Panachev I.A., Dubov G.M., Nokhrin S.A. Energy assessment of BelAZ-75131 gas-diesel mining dump trucks operation at Kuzbass open casts // E3S Web of Conferences. 2020, vol. 174, p. 03010. doi.org/10.1051/e3sconf/202017403010.

Сведения об авторах:

Дубов Георгий Михайлович – кандидат технических наук, доцент	Dubov Georgy Mikhailovich – candidate of technical sciences, associate professor
Нохрин Сергей Алексеевич – заместитель генерального директора	Nokhrin Sergey Alekseevich – deputy general director
Ходоровский Сергей Константинович – инженер-механик	Khodorovsky Sergei Konstantinovich – design engineer
dubovgm@kuzstu.ru	

Information about authors:

Получена 29.11.2023