

Научная статья

УДК 622.23.05

DOI: 10.26730/1816-4528-2023-3-59-66

Дубов Георгий Михайлович^{1*}, Нохрин Сергей Алексеевич²,
Ходоровский Сергей Константинович³, Стрельников Павел Алексеевич¹,
Черниченко Алексей Владимирович¹

¹Кузбасский государственный технический университет им Т.Ф. Горбачева, 650000, Россия, г. Кемерово, ул. Весенняя, 28

²ООО «ТехноЭко», 653046, Россия, г. Прокопьевск, ул. Азовская, 11

³ООО «КАМСС», 654217, Россия, Новокузнецкий район, п.ст.Тальжино, ул. Советская, 1А

*E-mail: nikokem@mail.ru

ИССЛЕДОВАНИЕ ПРЕДЕЛА СРЕДНЕЭКСПЛУАТАЦИОННОГО ЗАМЕЩЕНИЯ ДИЗЕЛЬНОГО ТОПЛИВА ГАЗОВЫМ ДЛЯ ОЦЕНКИ ВОЗМОЖНОЙ ПЕРСПЕКТИВЫ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ СПГ В КАЧЕСТВЕ МОТОРНОГО ТОПЛИВА ДЛЯ КАРЬЕРНЫХ САМОСВАЛОВ БЕЛАЗ



Информация о статье

Поступила:

18 мая 2023 г.

Одобрена после
рецензирования:

15 июня 2023 г.

Принята к печати:

27 июня 2023 г.

Опубликована:

11 июля 2023 г.

Ключевые слова:

карьерный самосвал; БелАЗ;
газодизельный режим работы;
дизельное топливо;
сжиженный природный газ;
эколого-экономическая эффективность

Аннотация.

Рассмотрен вопрос актуальности и перспективности использования на карьерных самосвалах альтернативного моторного топлива – сжиженного природного газа (СПГ), позволяющего повысить эколого-экономическую эффективность транспортировки горной массы. Говорится о том, что одним из перспективных направлений по снижению вредных выбросов в совокупности с экономической эффективностью является оснащение стандартной тяжелой карьерной техники криогенными бортовыми топливными системами. Для проведения исследований на борту карьерного самосвала БелАЗ-75131 была смонтирована система дистанционного сбора и передачи данных по времени эксплуатации самосвала на пяти различных загрузочных интервалах в течение одной рабочей смены. Обработка результатов исследований показала, что наибольшее время самосвал работал при нагрузке менее 10%. Наименьшее время самосвал работал при нагрузке от 35% до 60%. Наибольшее потребление дизельного топлива приходилось на нагрузку более 60% и выше. Наименьшее потребление дизельного топлива приходилось на нагрузку от 10% до 35%. На основе полученных и обработанных статистических данных произведено определение возможного среднеэксплуатационного предела замещения дизельного топлива сжиженным природным газом (СПГ) за определенный период времени и с учетом различных загрузочных интервалов. Получены результаты исследований среднестатистического распределения времени работы самосвала и расхода дизельного топлива в зависимости от его нагрузки. С учетом разницы в стоимости газового и дизельного топлива определен ожидаемый экономический эффект при эксплуатации самосвала в газодизельном (двухтопливном) режиме

Для цитирования: 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: 10.26730/1816-4528-2023-3-59-66, EDN: OGENVI

Введение

В горной промышленности от вида используемого технологического транспорта в значительной степени зависит эколого-экономическая эффектив-

ность процесса добычи полезных ископаемых. На сегодняшний день в Российских горнодобывающих компаниях нашли широкое применение карьерные самосвалы производства ОАО «БелАЗ», оснащен-

ные дизельными двигателями внутреннего сгорания Cummins.

В настоящее время как российскими, так и зарубежными компаниями реализуются инновационные проекты, связанные с разработкой новых технологий по замене дизельного (нефтяного) топлива на более дешевые и экологически менее безопасные энергоносители, которые в перспективе можно использовать в качестве моторного топлива на тяжелой карьерной технике [1-4].

Одним из таких перспективных энергоносителей является сжиженный природный газ (СПГ), который является наиболее приемлемой альтернативой нефтяному (дизельному) топливу. По мнению ряда исследователей, с учетом ряда критериев, таких как стоимость, экологичность и энергоэффективность, использование СПГ в качестве моторного топлива наиболее целесообразно [5-7].

Применение СПГ как альтернативного варианта моторного топлива также эффективно по следующим причинам:

- при транспортировке горной массы ежегодно потребляются сотни тысяч тонн дорогого дизеля, что отражается на конечной себестоимости конечного (добываемого) продукта;

- использование нефтяного (дизельного) топлива при перевозке горной массы на разрезах и карьерах со сложными горно-геологическими условиями сопровождается максимальными нагрузками на силовой агрегат – двигатель, что приводит к значительным расходам дизеля в совокупности с колоссальными выбросами выхлопных газов, содержащих вредные компоненты [8].

Одним из путей снижения выбросов вредных и канцерогенных веществ в атмосферу в совокупности с экономической эффективностью транспортировки горной массы является оснащение стандартной тяжелой карьерной техники криогенными бортовыми топливными системами. Данные системы позволяют экологически более безопасно и экономически более эффективно эксплуатировать в двухтопливном (газодизельном) режиме карьерную технику посредством частичного использования в качестве моторного топлива СПГ. Но для оценки перспективы использования СПГ в качестве моторного топлива для карьерных самосвалов БелАЗ обязательным и необходимым условием на первоначальном этапе является проведение исследований предела возможного среднеэксплуатационного частичного замещения дизельного топлива газовым [9-15].

Цель работы

Оценка предела возможного среднеэксплуатационного замещения дизельного топлива сжиженным природным газом (СПГ).

Методы исследования

При проведении полевых исследований на участках горных выработок одного из угледобывающих разрезов Кузбасса, а также в проведенных впоследствии расчетах использовались следующие физические параметры моторных топлив:

- сжиженный природный газ (СПГ): плотность жидкой фазы – 420 кг/куб.м; плотность паро-

вой фазы при н.у. – 0,7146 кг/куб.м; объемная теплота сгорания – 35,39 МДж/куб.м; массовая теплота сгорания (в пересчете на плотность паровой фазы) – 49,52 МДж/кг.

- дизельное топливо: средняя плотность жидкой фазы (согласно ГОСТ Р 52368 - 2005) – 822,5 кг/куб. м; массовая теплота сгорания 42,7 МДж/кг.

На первом этапе исследований на карьерном самосвале БелАЗ-75131 (грузоподъемностью 130 т) была скомпонована и смонтирована система дистанционного сбора данных, предназначенная для определения степени загрузки самосвала в реальном технологическом цикле эксплуатации на штатном дизельном топливе с привязкой к естественной временной шкале для получения характеристических циклограмм и их последующей обработки.

На испытуемом карьерном самосвале БелАЗ-75131 (далее – самосвал) дополнительно были установлены: датчик оборотов коленчатого вала дизельного двигателя Cummins KTA 50-C; датчики тока и напряжения тяговых электроприводов; жгуты электрических проводов; бокс с необходимым электронным оборудованием и микропроцессорным блоком обработки данных и передачи данных по каналу GSM на сервер аналитиков; антенна канала передачи информации (устанавливалась на крыше кабины водителя карьерного самосвала БелАЗ-75131).

Система сбора данных функционировала по следующему принципу. Поступающая от датчиков информация обрабатывалась в микропроцессорном блоке, и сформированные пакеты данных отправлялись по беспроводному каналу GSM на удаленный компьютер. Самосвал при этом выполнял стандартную работу в рамках текущих технологических задач на участках горных выработок угольного разреза. Ввиду сложных условий работы оборудования компаний, предоставляющих услуги доступа в сеть Интернет (например, во время нахождения самосвала в нижних точках угольного разреза) в электронном оборудовании был предусмотрен буфер накопления информации с последующей передачей записанной информации на удаленный сервер, например, в моменты выезда самосвала «наверх» из разреза.

На удаленном компьютере принимаемые цифровые данные сохранялись и архивировались в виде файлов. За каждую рабочую смену автоматически формировался отдельный файл данных, в котором содержалось около 40 тысяч «срезов» с информацией о мгновенной потребляемой мощности и текущих оборотах коленчатого вала дизельного двигателя Cummins KTA 50-C. Таким образом, за сутки формировалось два файла данных.

На втором этапе исследований, используя информацию о распределении мощности, оборотов коленчатого вала во времени, а также базовые паспортные параметры дизельного двигателя Cummins KTA50-C в соответствии с данными завода-изготовителя, выполнялась обработка полученных на первом этапе статистических данных. Далее на

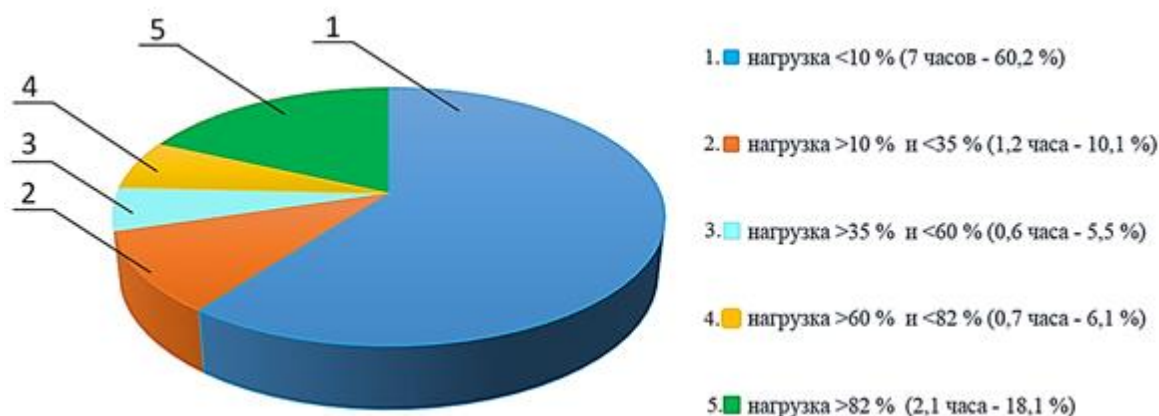


Рис. 1. Среднестатистическое распределение времени работы T (час) карьерного самосвала БелАЗ-75131 по нагрузочным зонам в течение одной рабочей смены

Fig. 1. Average statistical distribution of operation time T (hour) of BelAZ 75131 dump truck by load zones during one working shift

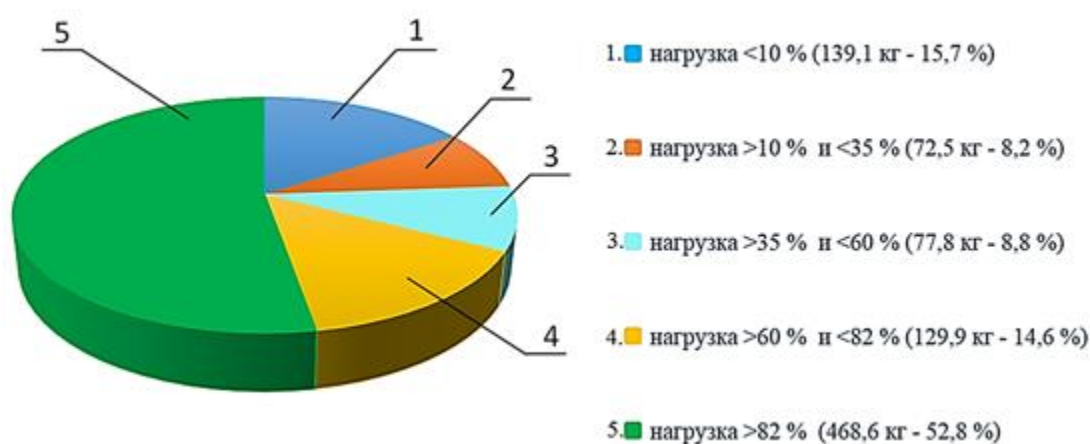


Рис. 2. Среднестатистическое распределение расхода дизельного топлива карьерного самосвала БелАЗ-75131 по нагрузочным зонам в течение одной рабочей смены

Fig. 2. Average statistical distribution of diesel fuel consumption of BelAZ 75131 dump truck by load zones during one working shift

их базе производился расчет возможного средне-эксплуатационного предела замещения дизельного топлива газовым за конкретный период времени с учетом различных нагрузочных интервалов, а также с учетом особенностей реализации двухтопливного (газодизельного) режима эксплуатации самосвала.

Обработка статистических данных осуществлялась за период эксплуатации самосвала в дизельном режиме на участках горных выработок угольного разреза в течение одной смены (11,6 часов) на протяжении семи дней. Все нагрузочное поле дизельного двигателя Cummins KTA50-C было условно разделено на приблизительно равные зоны нагрузки (кроме зоны холостого хода и очень малых нагрузок), итого пять нагрузочных зон: нагрузка до 10%; от 10% до 35%; от 35 до 60%; от 60 до 82%; свыше 82%. Вся последующая обработка статистических данных осуществлялась с учетом указанного деления.

Результаты и обсуждения

Обработка результатов исследований среднестатистического распределения времени работы самосвала по нагрузочным зонам (Рис. 1) показала, что наибольшее время самосвал работал при нагрузке менее 10%, что составляло 7 часов или 60,2% от общего времени работы самосвала в одну смену. Наименьшее время самосвал работал при нагрузке от 35% до 60%, что составляло 0,6 часа или 5,5% от общего времени работы самосвала в одну смену.

Обработка результатов исследований среднестатистического распределения расхода дизельного топлива самосвала по нагрузочным зонам (Рис. 2) показала, что наибольшее потребление дизельного топлива приходилось на нагрузку свыше 85%, что составляло 468,6 кг или 52,8% от общего потребления в смену. Наименьшее потребление дизельного топлива приходилось на нагрузку от 10% до 35%, что

Таблица 1. Данные по определению возможного предела замещения дизельного топлива сжиженным природным газом (СПГ)

Table 1. Data on determination of the possible limit for the replacement of diesel fuel with liquefied natural gas (LNG)

Период		Дизельный режим эксплуатации самосвала	Газодизельный режим эксплуатации самосвала		
№	Время начала и конца замера, час.	Общее потребление дизельного топлива в 1 смену, кг.	Потребление дизельного топлива в 1 смену, кг	Потребление СПГ за 1 смену, кг	Коэффициент замещения K_z , %
1	11:00-23:00	907,4	504,8	356,8	44,4
2	11:00-23:00	957,2	526,1	378,8	45,0
3	23:00-11:00	933,0	513,6	370,0	45,0
4	11:00-23:00	703,8	413,2	256,7	41,3
5	11:00-23:00	1057,5	559,2	440,4	47,1
6	23:00-11:00	920,6	516,6	357,1	43,9
7	23:00-11:00	855,8	488,1	326,3	43,0
8	11:00-23:00	837,4	472,6	322,5	43,6
9	23:00-11:00	841,1	481,1	318,1	42,8
10	23:00-11:00	795,4	463,1	293,9	41,8
11	11:00-23:00	919,6	511,1	362,6	44,4
12	23:00-11:00	887,9	499,9	345,0	43,7
13	11:00-23:00	800,0	465,1	297,1	41,9
Средние показатели		878,2	493,4	340,4	43,7

составляло 75,5 кг или 8,1% от общего потребления.

Исходными значениями для расчетов коэффициентов возможного предела замещения K_z дизельного топлива сжиженным природным газом (СПГ) являлись следующие: мгновенные значения потребления дизельного топлива за указанный период времени; мгновенные значения мощности, отдаваемой дизельным двигателем Cummins KTA50-C за тот же период времени; паспортные данные на дизельный двигатель Cummins KTA50-C по удельным расходам в зависимости от мощности. Расчет коэффициентов возможного предела замещения K_z дизельного топлива сжиженным природным газом осуществлялся посредством специальной программы для ЭВМ.

Данные, представленные в Таблице 1, говорят о том, что среднее количество потребляемого топлива самосвалом за каждые сутки эксплуатации в газодизельном (двухтопливном) режиме может составить: дизельное топливо – 986,8 кг; сжиженный природный газ (СПГ) – 680,8 кг. Таким образом, средний прогнозируемый расход СПГ за 1 смену может составить 340,4 кг, что говорит о полученном приемлемом среднем коэффициенте возможного предела замещения (K_z) дизельного топлива сжиженным природным газом (СПГ), составившим в среднем 43,7%.

Горно-геологические условия эксплуатации карьерных самосвалов, а именно сложность технологических трасс, обусловленная углами подъемов и их количеством, приводят к значительному потреблению топлива. Можно предположить, что оптимальные показатели эколого-экономической эффективности транспортировки горной массы газодизельными карьерными самосвалами будут полу-

чены при его эксплуатации на сложных участках технологических трасс, где происходит максимальное замещение дизельного топлива сжиженным природным газом (СПГ).

Также можно предположить, что работу криогенной бортовой топливной системы карьерного самосвала в режиме замещения дизельного топлива сжиженным природным газом (СПГ) можно настроить таким образом, чтобы в процессе работы дизельного двигателя самосвала подача дизельного топлива была ограничена на уровне запальной дозы, соответствующей режиму работы «до 10%» в чисто дизельном режиме. Остальная энергия для совершения работы дизельного двигателя может обеспечиваться подачей необходимого по энергии количества газового топлива.

По предварительным расчетам с учетом такого ключевого критерия, как отношение стоимости дизельного топлива к стоимости природного газа, ожидаемый экономический эффект при эксплуатации карьерного самосвала БелАЗ-75131 в газодизельном (двухтопливном) режиме на двух видах топлива, дизельном и газовом, может составить в среднем 22,1%. Указанный экономический эффект определен без учета дисконтирования, технологических потерь газа и других ухудшающих коэффициентов.

Заключение

1. Выявленные особенности технологического цикла эксплуатации карьерного самосвала БелАЗ-75131 показали, что время работы самосвала на нагрузках до 10% (холостой ход и сверхмалые нагрузки) занимает самый значительный вклад – 60% от общего времени его работы в одну смену.

2. Анализ вклада расхода дизельного топлива на различных нагрузочных зонах показал, что само-

свал работает на различных нагрузках во всем диапазоне полного нагрузочного поля, но основной вклад (67,4%) в общее потребление топлива вносит участок с нагрузкой более 60%.

3. Полученный средний (43,7%) коэффициент возможного предела замещения K_z дизельного топлива газовым говорит о перспективности оснащения криогенными бортовыми топливными системами тяжелых карьерных самосвалов БелАЗ, позволяющими использовать сжиженный природный газ (СПГ) в качестве моторного топлива.

4. Наилучшие эколого-экономические показатели эффективности транспортировки горной массы газодизельными карьерными самосвалами в сравнении с классическими дизельными будут получены при эксплуатации самосвалов на сложных участках технологических трасс, где происходит максимальное замещение дизельного топлива сжиженным природным газом (СПГ).

5. Учитывая разницу в стоимости газового и дизельного топлива, ожидаемый экономический эффект при эксплуатации карьерных самосвалов БелАЗ-75131 на газодизельной смеси (двух видах топлив) по предварительным оценкам может составить 22,1%.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Ельцов И. Е., Чегошев А. А., Нохрин С. А. Реконструкция палубы карьерного самосвала БелАЗ-75131 для обеспечения его эксплуатации в газодизельном режиме // Инновации в машиностроении: сборник трудов XII Международной научно-практической конференции. Новосибирск : Изд-во НГТУ, 2021. С. 303–310.
2. Дубов Г. М., Богомолов 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(155). С. 20–31. DOI: 10.26730/1816-4528-2021-3-20-31.
3. 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: 10.1051/e3sconf/202131503011.
4. 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 // Nexa Revista Científica. 2022. Vol. 35. No 2. P. 552–565. DOI: 10.5377/nexo.v35i02.14634.
5. Song H., Ou X., Yuan J., Wang C. L. Energy consumption and greenhouse gas emissions of diesel/LNG heavy-duty vehicle fleets in China based on a bottom-up model analysis // Energy. 2017. Vol. 140. P. 966–978. DOI: 10.1016/j.energy.2017.09.011.
6. Hu M., Huang W., Cai J., Chen J. The evaluation on liquefied natural gas truck promotion in Shenzhen freight // Advances in Mechanical Engineering. 2017. Vol. 9. №6. P. 1–10. DOI: 10.1177/1687814017705065.
7. Li J., Wu B., Mao G. Research on the performance and emission characteristics of the LNG-diesel marine engine // Journal of Natural Gas Science and Engineering. 2015. Vol. 27. P. 945–954. DOI: 10.1016/j.jngse.2015.09.036.
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 : Изд-во НГТУ, 2021. С. 311–318.
9. 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, 20–23 апреля 2021 года. Кемерово : Кузбасский государственный технический университет имени Т. Ф. Горбачева, 2021. С. 103031–103036.
10. 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.
11. Xing Y., Song H., Yu M. et al. The characteristics of greenhouse gas emissions from heavy-duty trucks in the Beijing-Tianjin-Hebei (BTH) region in China // Atmosphere. 2016. Vol. 7. №9. P. 121–132. DOI: 10.3390/atmos7090121.
12. Osorio-Tejada J., Llera E., Scarpellini S. LNG: an alternative fuel for road freight transport in Europe // WIT Transactions on The Built Environment. 2015. Vol. 168. P. 235–246. DOI: 10.2495/SD150211.
13. Osorio-Tejada J. L., Llera-Sastresa E., Scarpellini S. Liquefied natural gas: Could it be a reliable option for road freight transport in the EU? // Renewable and Sustainable Energy Reviews. 2017. Vol. 71. P. 785–795. DOI: org/10.1016/j.rser.2016.12.104.
14. Koptev V. Y., Kopteva A. V. Structure of energy consumption and improving open-pit dump truck efficiency // IOP Conference Series: Earth and Environmental Science. 2017. Vol. 87. №2. P. 022010. DOI: 10.1088/1755-1315/87/2/022010.
15. Cheenkachorn K., Poompipatpong C., Ho C. G. Performance and emissions of a heavy-duty diesel engine fuelled with diesel and LNG (liquid natural gas) // Energy. 2013. Vol. 53. P. 52–57. DOI: 10.1016/j.energy.2013.02.027.

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Об авторах:

Дубов Георгий Михайлович, кандидат технических наук, доцент, Кузбасский государственный технический университет имени Т.Ф. Горбачева, (650000, Россия, г. Кемерово, ул. Весенняя, 28), e-mail: nikokem@mail.ru

Нохрин Сергей Алексеевич, заместитель генерального директора по газификации автотранспорта, ООО «ТехноЭко», (653046, Россия, г. Прокопьевск, ул. Азовская, 11)

Ходоровский Сергей Константинович, инженер-механик, ООО «КАМСС», (654217, Россия, Новокузнецкий район, п.ст.Тальжино, ул. Советская, 1А)

Стрельников Павел Алексеевич, кандидат педагогических наук, доцент, Кузбасский государственный технический университет имени Т.Ф. Горбачева, (650000, Россия, г. Кемерово, ул. Весенняя, 28)

Черниченко Алексей Владимирович, аспирант, Кузбасский государственный технический университет имени Т.Ф. Горбачева, (650000, Россия, г. Кемерово, ул. Весенняя, 28)

Заявленный вклад авторов:

Дубов Георгий Михайлович — постановка исследовательской задачи, концептуализация исследований, написание текста.

Нохрин Сергей Алексеевич — сбор и анализ данных.

Ходоровский Сергей Константинович — научный менеджмент.

Стрельников Павел Алексеевич — выводы, написание текста.

Черниченко Алексей Владимирович — обзор соответствующей литературы.

Все авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.

Original article

DOI: 10.26730/1816-4528-2023-3-59-66

Georgiy M. Dubov¹, Sergey A. Nokhrin², Sergey A. Khodorovsky³, Pavel A. Strelnikov¹, Alexey V. Chernichenko¹

¹T.F. Gorbachev Kuzbass State Technical University

²«TekhnoEco» LLC

³«KAMSS » LLC

*E-mail: nikokem@mail.ru

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



Article info

Received:

18 May 2023

Accepted for publication:

15 June 2023

Accepted:

27 June 2023

Published:

11 July 2023

Keywords: BelAZ; gas-diesel operation; diesel fuel; lique-

Abstract.

The issue of urgency and viability of the use of alternative motor fuel - liquefied natural gas (LNG) on dump trucks allowing the increase in environmental and economic efficiency of rock mass haulage is considered. It is said that one of the promising directions of decreasing harmful emissions together with providing economic efficiency is the equipment of standard heavy-duty dump trucks with cryogenic onboard fuel systems. To conduct research, a system for remote collection and transmission of data on the time of operation of a dump truck in five different loading intervals during one working shift was installed on board the BelAZ-75131 mining dump truck. The data were statistically processed, and a calculation was made on that basis. Processing of research results showed that the dump truck worked most of the time at a load of less than 10%. The dump truck worked for the least time at a load of 35% to 60%. The highest consumption of diesel fuel was at a load of more than 60% and above. The lowest consumption of diesel fuel was at a load of 10% to 35%. The possible average operating limit for replacing diesel fuel with liquefied natural gas (LNG) for a certain period of time is determined based on the obtained and processed statistical data taking into account various load intervals. The results of studies of

fied natural gas; environmental and economic efficiency.

average statistical distribution of dump truck operation time and diesel fuel consumption depending on its load are obtained. Taking into account the difference in the cost of gas and diesel fuel, the economic potential of gas-diesel (dual-fuel) dump truck operation is determined.

For citation: Dubov G.M., Nokhrin S.A., Khodorovsky S.A., 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*, 2023; 3(167):59-66 (In Russ., abstract in Eng.). DOI: 10.26730/1816-4528-2023-3-59-66, EDN: OGEHVI

REFERENCES

1. Eltsov I.E., Chegoshchev A.A., Nokhrin S.A. Reconstruction of the deck of the BelAZ 75131 dump truck to provide its gas-diesel operation. *Innovations in mechanical engineering: Proceedings of the XII International Scientific-Practical Conference*. Novosibirsk: NSTU Publishing house; 2021.
2. Dubov G.M., Bogomolov A.R., Azikhanov S.S., Grigorieva E.A., Nohrin S.A. Investigation of consumption and temperature characteristics of BelAZ-75131 gas-diesel dump trucks. *Mining equipment and electromechanics*. 2021; 3(155):20–31. DOI: 10.26730/1816-4528-2021-3-20-31.
3. 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; 315:03011. DOI: 10.1051/e3sconf/202131503011.
4. 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 Revista Científica*. 2022; 35(2):552–565. DOI: 10.5377/nexo.v35i02.14634
5. Song H., Ou X., Yuan J., Wang C.L. Energy consumption and greenhouse gas emissions of diesel/LNG heavy-duty vehicle fleets in China based on a bottom-up model analysis. *Energy*. 2017; 140:966–978. DOI: 10.1016/j.energy.2017.09.011.
6. Hu M., Huang W., Cai J., Chen J. The evaluation on liquefied natural gas truck promotion in Shenzhen freight. *Advances in Mechanical Engineering*. 2017; 9(6):1–10. DOI: 10.1177/1687814017705065.
7. Li J., Wu B., Mao G. Research on the performance and emission characteristics of the LNG-diesel marine engine. *Journal of Natural Gas Science and Engineering*. 2015; 27:945–954. DOI: 10.1016/j.jngse.2015.09.036.
8. Chegoshchev A.A., Nohrin S.A., Eltsov I.E. Liquefied natural gas as an alternative to diesel (petro-

leum) fuel for BelAZ dump trucks. *Innovations in mechanical engineering: Proceedings of the XII International Scientific and Practical Conference*. Novosibirsk: NSTU Publishing house; 2021.

9. 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, 20-23 April 2021. Kemerovo: T.F. Gorbachev Kuzbass State Technical University; 2021. P. 103031–103036.

10. 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; 1:83–90.

11. Xing Y., Song H., Yu M. et al. The characteristics of greenhouse gas emissions from heavy-duty trucks in the Beijing-Tianjin-Hebei (BTH) region in China. *Atmosphere*. 2016; 7(9):121–132. DOI: doi:10.3390/atmos7090121.

12. Osorio-Tejada J., Llera E., Scarpellini S. LNG: an alternative fuel for road freight transport in Europe. *WIT Transactions on The Built Environment*. 2015; 168:235–246. DOI: 10.2495/SD150211.

13. Osorio-Tejada J.L., Llera-Sastresa E., Scarpellini S. Liquefied natural gas: Could it be a reliable option for road freight transport in the EU? *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 2017; 71:785–795. DOI: org/10.1016/j.rser.2016.12.104.

14. Koptev V.Y., Kopteva A.V. Structure of energy consumption and improving open-pit dump truck efficiency. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*. 2017; 87(2):022010. DOI: 10.1088/1755-1315/87/2/022010.

15. Cheenkachorn K., Poornpipatpong C., Ho C.G. Performance and emissions of a heavy-duty diesel engine fuelled with diesel and LNG (liquid natural gas). *Energy*. 2013; 53:52–57. DOI: 10.1016/j.energy.2013.02.027.

© 2023 The Author. This is an open access article under the CC BY license (<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>).

The author declare no conflict of interest.

About the author:

Georgiy M. Dubov^{*}, C. Sc. in Engineering, Associate Professor, T.F. Gorbachev Kuzbass State Technical University, (28, Vesennyaya St., Kemerovo, 650000, Russian Federation), e-mail: nikokem@mail.ru

Sergey A. Nokhrin², Deputy General Director for Gasification of Motor Transport, «TekhnoEco» LLC, (11 Azovskaya St., Prokopyevsk, 653046, Russian Federation)

Sergey A. Khodorovsky³, Design Engineer, «KAMSS » LLC, (1A Sovetskaya St., Novokuznetsk district, v.st. Talzhino, 650991, Russian Federation)

Pavel A. Strelnikov¹, C. Sc. in Pedagogy, Associate Professor, T.F. Gorbachev Kuzbass State Technical University, (28, Vesennyya St., Kemerovo, 650000, Russian Federation)

Alexey V. Chernichenko¹, Post-graduate Student, T.F. Gorbachev Kuzbass State Technical University, (28, Vesennyya St., Kemerovo, 650000, Russian Federation)

Contribution of the authors:

Dubov Georgy Mikhailovich — formulation of a research problem, conceptualization of research, writing a text.

Nokhrin Sergey Alekseevich — data collection and analysis.

Khodorovsky Sergey Konstantinovich — scientific management.

Strelnikov Pavel Alekseevich — conclusions, writing the text.

Chernichenko Alexey Vladimirovich — review of the relevant literature.

Author have read and approved the final manuscript.

