

Богомолов Александр Романович^{1,2,*}, доктор технических наук, доцент, **Азиханов Сергей Сейфудинович**^{1,2}, кандидат технических наук, доцент, **Дубов Георгий Михайлович**¹, кандидат технических наук, доцент, **Григорьева Елена Анатольевна**¹, старший преподаватель, **Нохрин Сергей Алексеевич**³, заместитель генерального директора по газификации автотранспорта

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

²Институт теплофизики имени С.С. Кутателадзе СО РАН, 630090, Россия, г. Новосибирск, проспект Академика Лаврентьева, д. 1

³ООО «ТехноЭко», 653046, Россия, г. Прокопьевск, ул. Азовская, 11

*E-mail: barom@kuzstu.ru

ИССЛЕДОВАНИЕ СОСТАВА ВЫХЛОПНЫХ ГАЗОВ КАРЬЕРНЫХ САМОСВАЛОВ БЕЛАЗ 75131, РАБОТАЮЩИХ В ДИЗЕЛЬНОМ И ГАЗОДИЗЕЛЬНОМ РЕЖИМАХ

Аннотация: рассматривается состояние вопроса по сравнительному исследованию состава выхлопных газов дизельных двигателей КТА 50, карьерных самосвалов БелАЗ 75131, осуществляющих транспортировку горной массы в дизельном и газодизельном режимах. Проводится краткий анализ по востребованности и условиям эксплуатации данного вида карьерных самосвалов, а также мирового опыта по переводу внедорожной техники на сжиженный природный газ. Отмечается, что в сегменте тяжелого карьерного транспорта использование альтернативных источников топлива представляется одним из возможных перспективных путей снижения техногенного воздействия на окружающую среду. Приведена методика проведения исследований. Представлены данные по предельно допустимым значениям удельных средневзвешенных выбросов вредных веществ, а также значения корректирующих коэффициентов; значения коэффициента состава топлива; результаты измерений в стационарных условиях расхода тосола и воздуха, подаваемого в цилиндр двигателя внутреннего сгорания КТА 50 при холостом ходе в дизельном режиме работы. Описаны и обоснованы полученные данные по сравнению концентрации CH , CO , O_2 и CO_2 при эксплуатации (движении пустых и груженых карьерных самосвалов в гору и при спуске с горы) в дизельном и газодизельном режимах карьерных самосвалов БелАЗ 75131. Отражены результаты расчета средневзвешенных выбросов вредных веществ с выхлопными газами дизельных двигателей КТА 50, карьерных самосвалов БелАЗ 75131; результаты расчета коэффициентов избытка воздуха α . Приведена детализация условий проводимых измерений и сделаны краткие выводы.

Ключевые слова: карьерный самосвал, выхлопные газы, сжиженный природный газ, дизельное топливо, газодизельный режим работы.

Информация о статье: принята 05 февраля 2021 г.
DOI: 10.26730/1816-4528-2021-2-30-41

Введение

Потребность в твердых полезных ископаемых ежегодно возрастает. Программа развития угольной промышленности России предполагает увеличение добычи угля до 500 млн т в год к 2030 г. Это приведет к значительному росту количества карьерной техники, используемой горнодобывающими компаниями [1].

Рост количества и глубины разрезов, усложнение горно-геологических условий месторождений, а также интенсификация горных работ обуславливают концентрацию техники в ограниченном пространстве, а значит, увеличение поступлений вредных примесей в атмосферу и ухудшение естественного воздухообмена. Увеличение за последние десятилетия

объемов открытых горных работ способствует повышению потребления дизельного топлива карьерными самосвалами, что приводит к увеличению выбросов выхлопных газов. Ежегодно мировой горнодобывающей промышленностью потребляются миллиарды литров дизельного топлива, причем 70-80% общего объема топлива потребляют нагруженные самосвалы на подъемах при относительно малой скорости движения. Это приводит к значительному выбросу в атмосферу вредных (токсичных) веществ: оксидов углерода, азота, углеводорода, альдегидов, свинца, сажи, оксидов серы [2-4].

Эколого-экономическая эффективность добычи полезных ископаемых открытым способом напрямую зависит от вида используемого технологиче-

Таблица 1. Компоненты, диапазон измерений, пределы допускаемой погрешности

Table 1. Components, measuring range, limits of permissible error

Измеряемый компонент	Диапазон измерения	Цена деления	Участок диапазона измерения	Погрешность абсолютная	Погрешность относительная
СН	0-3000 млн ⁻¹	1 млн ⁻¹	0/333 млн ⁻¹ 333/3000 млн ⁻¹	± 20 млн ⁻¹ –	– ± 6%
СО	0-7 %	0,01 %	0/3,3 % 3,3/7 %	± 0,2% –	– ± 6%
СО ₂	0/16 %	0,1 %	0/16 %	± 1%	–
О ₂	0/21 %	0,1 %	0/3,3 % 3,3/21 %	± 0,2% –	– ± 6%

ского транспорта. Основным видом технологического транспорта для перевозки горной массы являются тяжелые карьерные самосвалы [5]. При транспортировке горной массы в Российских горнодобывающих компаниях наибольшее распространение получили тяжелые карьерные самосвалы БелАЗ с дизельными двигателями внутреннего сгорания. Автопарки горнодобывающих компаний в основном оснащены карьерными самосвалами модели БелАЗ-75131 и их модификациями [6-9]. Лидирующее место в общем объеме отгрузки ОАО «БЕЛАЗ» (управляющая компания холдинга «БЕЛАЗ-ХОЛДИНГ») в 2019 г. заняли карьерные самосвалы грузоподъемностью 110-130 тонн – 27%. При этом самой продаваемой моделью стал БелАЗ-75131, на ее долю приходится 23% от общего объема реализации карьерных самосвалов.

При эксплуатации тяжелых карьерных самосвалов одним из перспективных путей снижения объемов вредных выбросов в атмосферу, и, как результат, снижения техногенного воздействия на окружающую среду может являться использование альтернативных (более экологичных) видов топлива. Сегодня во многих странах активно проводятся работы по переводу внедорожной техники – тягачей, буксиров, буровых установок, автотехники повышенной грузоподъемности и карьерных самосвалов – на сжиженный природный газ. Например, в Китае эксплуатируются 240 000 грузовиков большой грузоподъемности на сжиженном природном газе, 5000 используется по США и 1500 – по Европе. В Мек-

сике с 2016 года и в Турции с 2018 года на золотодобывающих рудниках эксплуатируются первые экспериментальные карьерные самосвалы Caterpillar (грузоподъемностью 130 и 220 тонн), оснащенные криогенными бортовыми топливными системами и работающие по газодизельному циклу [10-12].

В России первый интегрированный проект по производству сжиженного природного газа и модернизации тяжелых карьерных самосвалов БелАЗ для обеспечения их эксплуатации в газодизельном режиме успешно реализовали компании: ООО «Ресурс»; ООО «Сибирь-Энерго»; ООО «ТехноЭко» при техническом и научном сопровождении ОАО «БЕЛАЗ» – управляющая компания холдинга «БЕЛАЗ-ХОЛДИНГ»; ООО «КАМСС»; ФГБОУ ВО КузГТУ.

В ходе реализации проекта в 2017 году введена в эксплуатацию первая очередь завода по сжижению природного газа производственной мощностью 1,5 т в час. Создана заправочная инфраструктура, включающая современные, не имеющие аналогов в РФ криогенные передвижные автозаправщики и заправочные площадки. При научном и инженерном сопровождении ученых Кузбасского государственного технического университета имени Т.Ф. Горбачева разработан технический проект по модернизации карьерных самосвалов БелАЗ 75131 (грузоподъемностью 130 тонн) для их работы по газодизельному циклу. Данный технический проект был согласован заводом-изготовителем карьерных самосвалов ОАО «БЕЛАЗ». В рамках работы над проектом

Таблица 2. Предельно допустимые значения удельных средневзвешенных выбросов вредных веществ

Table 2. Maximum permissible values of specific weighted average emissions of harmful substances

Наименование нормируемого параметра	Обозначение	Назначение двигателя	Норма удельных средневзвешенных выбросов	
			Выпуск до 2000 г.	Выпуск после 2000 г.
Удельный средневзвешенный выброс оксида углерода (СО), г/(кВт·ч)	e_{CO}^P	Любое	6,0	3,0
Удельный средневзвешенный выброс углеводородов (СН) в приведении к СН, г/(кВт·ч)	e_{CH}^P	Любое	2,4	1,0
Удельный средневзвешенный выброс диоксида углерода (СО ₂), г/(кВт·ч)	$e_{CO_2}^P$	Любое	–	–



Рис. 1. Поточный металлорукав для подачи в газоанализатор выхлопных газов
Fig. 1. In-line metal hose for feeding exhaust gas into the analyzer

Таблица 3. Значения корректирующих коэффициентов

Table 3. Correction coefficient values

Вредное вещество	Значения корректирующего коэффициента $k_{рем}$
оксид углерода (CO)	1,2
углеводороды (CH)	1,25
диоксид углерода (CO ₂)	–

Таблица 4. Значение коэффициента состава топлива

Table 4. Fuel composition factor value

Вид топлива	Значение коэффициента состава топлива F_f , м ³ /кг, для состояния отработавших газов	
	влажного	сухого
Дизельное	0,75	–0,77
Природный газ	1,33	–1,34

было разработано и внедрено несколько модификаций криогенных бортовых топливных систем (КБТС) для тяжелых карьерных самосвалов БелАЗ 75131. Разработан уникальный измерительный комплекс, позволяющий обеспечивать равномерность подачи газа в цилиндры ДВС, обеспечивать устойчивость его работы, исключить детонацию при работе двигателя в газодизельном режиме и, наконец, отслеживать расход газа в текущий момент времени, а также за определенный период времени. На сегодняшний день оснащены криогенными бортовыми топливными системами и успешно эксплуатируются 60 карьерных самосвалов БелАЗ 75131 с дизельными двигателями КТА 50 [12-13].

Целью представленной работы являются сравнительные исследования состава выхлопных газов дизельных двигателей КТА 50, карьерных самосвалов БелАЗ 75131, эксплуатирующихся в дизельном и газодизельном режимах на угольных разрезах Кузбасса.

Методика проведения исследований

Анализ выхлопных газов (ВГ) проводился с использованием газоанализатора «АВТОТЕСТ –

01.03М»,

дата поверки – июнь 2020 г.

Компоненты, диапазон измерений и пределы допускаемой погрешности приведены в таблице 1.

Заборные патрубки 1,2 (рис. 1) монтировались в каждый из выхлопных газовых коллекторов дизельного двигателя КТА 50, далее соединялись через тройник 3 в один общий металлорукав 4, который через гибкий шланг и фильтрующий элемент подключался к газоанализатору «АВТОТЕСТ – 01.03М».

ГОСТ Р 51249-99 определяет удельный средневзвешенный выброс вредного вещества как количество вредного вещества, выбрасываемого в атмосферу с ВГ, приходящееся на 1 кВт·ч эффективной работы двигателя при совершении им полного испытательного цикла, т.е. г/(кВт·ч).

Предельно допустимые значения удельных средневзвешенных выбросов вредных веществ для вновь изготовленных судовых, промышленных и тепловозных двигателей при их стендовых испытаниях должны соответствовать значениям, приведенным в таблице 2.

Для двигателей после капитального ремонта предельно допустимые значения удельных средневзвешенных выбросов вредных веществ с ВГ двигателей, прошедших капитальный ремонт $[e_i^p]_{рем}$, устанавливались на основе данных таблицы 2 с использованием корректирующих коэффициентов по формуле $k_{рем}$:

$$[e_i^p]_{рем} = k_{рем} e_i^p \quad (1)$$

Значения корректирующих коэффициентов в зависимости от вредного вещества устанавливались по данным из таблицы 3.

На каждом режиме испытаний двигателя измерению подлежали следующие показатели:

- эффективная мощность P_e , кВт;
- частота вращения коленчатого вала n , мин⁻¹;
- расход воздуха, приведенный к нормальным атмосферным условиям ($P_0 = 101,3$ кПа, $T_0 = 273$ К) – V_{air} , м³/ч;
- концентрация в ВГ оксида углерода C_{CO} , об. %;
- концентрация в ВГ оксидов кислорода C_{O_2} , об. %;
- концентрация в ВГ суммы углеводородов (приведение к $C_{H_{1,85}}$) – C_{CH} , ppm или об. %.

Удельный средневзвешенный выброс i -го вредного вещества рассчитывался по формуле:

$$e_i^p = 0,446 \mu_i \frac{\sum_{j=1}^m C_{ij} V_{exhj} \omega_j}{P_{en} \sum_{j=1}^m \bar{P}_{ej} \omega_j} \quad (2)$$

где μ_i – молекулярная масса i -го вредного вещества либо его эквивалента по приведению ($\mu_{CO} = 28$, $\mu_{CH} = 13,85$, $\mu_{CO_2} = 44$), кг/кмоль;

Таблица 5. Результаты измерений температурных и расходных характеристик в стационарных условиях
Table 5. Results of measurements of temperature and flow characteristics under stationary conditions

№	Условия работы	Обороты двигателя, об/мин.	Расход тосола, л/мин.	Расход тосола, м ³ /с	Скорость воздуха средняя в левом трубопроводе ω ₁ , м/с	Скорость воздуха средняя в правом трубопроводе ω ₂ , м/с	Средний суммарный расход воздуха двух коллекторов, V _{air} , м ³ /ч*
1	холостой ход	650	46,08	0,000768	3,81	3,98	880,6
2	холостой ход	1000	71,67	0,0011944	5,30	5,53	1224,2
3	холостой ход	1950	124	0,0020667	11,60	11,73	2637,2

* Диаметр входных коллекторов составляет 200 мм.

Таблица 6. Результаты замеров выхлопных газов карьерных самосвалов БелАЗ 75131 при дизельном режиме работы и максимальной нагрузке

Table 6. Results of measurements of exhaust gases of diesel fuelled BelAZ 75131 mining dump trucks at maximum load

Измеряемый компонент	Борт 3576 (02.06.2020г.)	Борт 3642 (11.06.2020г.)	Борт 3327 (19.06.2020г.)	Борт 3588 (19.06.2020г.)
СО, %	0,05	0,06	0,07	0,14
О ₂ , %	–	9,8-11,8	9,85	10,1
СО ₂ , %	8,05	8,52	7,97	8,59
СН, ppm	10	0	10	0
Обороты двигателя	1850	1870	1970	1870

Таблица 7. Результаты замеров выхлопных газов карьерных самосвалов БелАЗ 75131 при газодизельном режиме работы и максимальной нагрузке

Table 7. Results of measurements of exhaust gases of gas-diesel fuelled BelAZ 75131 mining dump trucks at maximum load

Измеряемый компонент	Борт 3576 (02.06.2020г.)	Борт 3642 (11.06.2020г.)	Борт 3327 (19.06.2020г.)	Борт 3588 (19.06.2020г.)
СО, %	0,16	0,18	0,21	0,32
О ₂ , %	–	9,5–11,5	10,2	10,7
СО ₂ , %	7,62	7,98	7,55	8,05
СН, ppm	40	40	30	60
Обороты двигателя	1930	1940	1940	1940

m – количество режимов испытаний в испытательном цикле;

j – порядковый номер режима испытаний в испытательном цикле;

i – индекс вредного вещества;

C_{ij} – измеренная при испытаниях в j -м заданном режиме концентрация i -го вредного вещества в ВГ, об. %;

V_{exhj} – объемный расход ВГ, приведенный к нормальным атмосферным условиям ($P_0 = 101,3$ кПа, $T_0 = 273$ К), м³/ч, во «влажном» или «сухом» состоянии;

P_{ej} – отношение эффективной мощности дизеля на данном режиме испытаний к номинальной эффективной мощности;

$\omega_j = 0,1-0,15$ – весовой коэффициент режима;

P_{en} – номинальная эффективная мощность дизеля, кВт.

Объемный расход ВГ V_{exh} , м³/ч, измеряют любым прямым способом с последующим приведением к

стандартным атмосферным условиям либо рассчитывают по измеренным значениям расхода воздуха и топлива на каждом режиме испытаний по формуле:

$$V_{exh} = V_{air} + F_f B_f, \quad (3)$$

где V_{air} – объемный расход воздуха, приведенный к нормальным атмосферным условиям ($P_0 = 101,3$ кПа,

$T_0 = 273$ К), м³/ч;

F_f – коэффициент приведения к нормальным атмосферным условиям расхода неразбавленных продуктов сгорания различных топлив (м³/кг), принимаемый по данным приведенным в таблице 4 для «сухого» или «влажного» состояния ВГ (или коэффициент состава топлива);

B_f – массовый расход топлива, кг/ч.

Массовый расход топлива (дизельного) при номинальной частоте 1900 об./мин. и номинальной

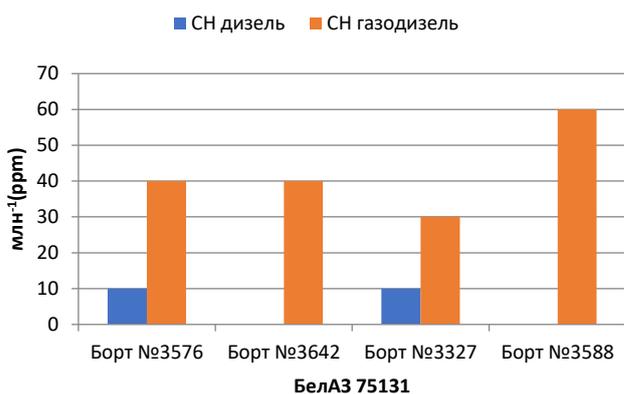


Рис. 2. Концентрации CH в выхлопных газах при дизельном и газодизельном режимах работы двигателя КТА 50, карьерных самосвалов БелАЗ 75131 при максимальной нагрузке
 Fig. 2. CH concentration in exhaust gases of KTA 50 engine of diesel and gas-and-diesel fuelled BelAZ 75131 mining dump trucks at maximum load

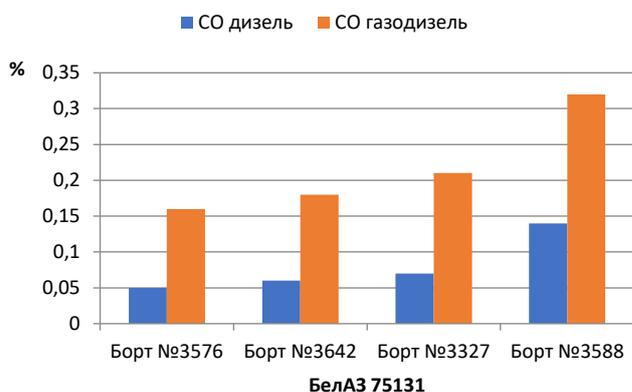


Рис. 3. Концентрации CO в выхлопных газах при дизельном и газодизельном режимах работы двигателя КТА 50, карьерных самосвалов БелАЗ 75131, при максимальной нагрузке
 Fig. 3. CO concentration in exhaust gases of KTA 50 engine of diesel and gas-and-diesel fuelled BelAZ 75131 mining dump trucks at maximum load

мощности 1200 (1194) кВт составляет 207 г/(кВт·ч) или $V_f = 248,4$ кг/ч.

«Влажное» состояние ВГ принималось для случаев, когда влагосодержание неразбавленной пробы газов, подаваемой в газоанализатор, соответствовало полному составу продуктов сгорания. «Сухое» состояние ВГ принималось для случаев, когда влагосодержание неразбавленной пробы газов, подаваемой в газоанализатор, меньше или равно равновесному при температуре ниже 298К. Для остальных случаев принималось «сухое» состояние ВГ.

Результаты и обсуждение

На первоначальном этапе были проведены измерения расходных характеристик в стационарных условиях (холостой ход) тосола и воздуха, подаваемого в цилиндры ДВС КТА 50 при 650, 1000 и

1950 об/мин. Расход тосола составил: 46,08; 71,6; 124 л/мин. соответственно. Расход тосола определяли ультразвуковым расходомером «Portaflo 220A». При работе двигателя на холостом ходу расходовалось только дизельное топливо, газ при этом не потреблялся. С использованием дифференциального манометра TESTO-512 и трубок Пито-Прандтля были измерены скорости движения воздуха в левом и правом трубопроводах (таблица 5).

Перед началом измерений в реальных производственных условиях выполнялся прогрев газоанализатора. В соответствии с ГОСТ Р 51249-99 и ГОСТ ISO 8178-4-2013 измерения проводились на режимах работы двигателя в соответствии с его назначением. Измерения начинались с режима полной мощности и далее последовательно приближались к режиму минимальной нагрузки. Отсчет показаний газоанализаторов проводился на каждом режиме три раза с интервалом не менее 1 мин, причем первый отсчет проводился не ранее чем через 2 мин после установления температурного состояния двигателя на режиме испытаний. Результаты трех последовательных отсчетов должны отличаться друг от друга не более чем на 10%. За результат измерений принималось среднее арифметическое трех отсчетов. Одновременно регистрировались показатели двигателя, необходимые для определения значений нормируемых параметров.

Для сравнительного анализа содержания выхлопных газов замеры проводились в дизельном режиме работы карьерных самосвалов КТА 50, а затем по тому же маршруту движения в газодизельном режиме. Результаты замеров при максимальной нагрузке (груженный в гору) сведены в таблицах 6,7.

Задача исследования состава выхлопных газов относится не к работе двигателя на стенде, а к его работе в режиме движения по сложной горно-геологической местности. В основном проведены измерения выхлопных газов во время движения карьерных самосвалов в гору в нагруженном состоянии. В связи с этим данные относятся к одному режиму – режиму, близкому к мощности двигателя при максимальной нагрузке.

Режимы испытаний (испытательный цикл) проводились при максимально приближенно фиксированных по частоте вращения мощности режимах работы дизельного двигателя КТА 50, устанавливаемых в соответствии с его назначением и реализуемым в процессе испытаний при подъеме в гору груженых карьерных самосвалов БелАЗ 75131.

На рис. 2 приведено наглядное сравнение значений (данные табл. 6,7) концентраций СН (углеводороды) в выхлопных газах при дизельном и газодизельном режимах работы двигателя КТА 50, карьерных самосвалов БелАЗ 75131 при максимальной нагрузке (движение в гору).

В дизельном режиме работы концентрация СН в ВГ у карьерных самосвалов с бортовыми номерами 3576

и 3327 составляла по показаниям газоанализатора 10 ppm. В ВГ БелАЗов с бортовыми номерами 3642 и 3588 содержание углеводородов отсутствовало. В газодизельном режиме фиксировалось присутствие в ВГ углеводородов СН. Концентрация СН в ВГ изменялась от 30 до 60 ppm. Наличие не прореагировавшего топлива в виде углеводородов СН в выхлопных газах может быть от подачи топливной газо-воздушной смеси при работе двигателя в газодизельном режиме и выхода части газо-воздушной смеси из полости цилиндра в выпускной коллектор.

В [14] указано, что на содержание в выхлопных газах исходного топлива в виде газовой смеси важную роль отражает газообмен, т.е. смена рабочего тела при осуществлении процесса выпуска и впуска. Опыт показывает, что для лучшего газообмена в период перекрытия клапанов впускной клапан традиционно начинают открывать примерно за 10-30° до прихода поршня в верхнюю мертвую точку (ВМТ), а выпускной клапан закрывают спустя 10-50° после ВМТ. В этот период оба клапана открыты (период перекрытия клапанов). В оптимальном случае при условии меньшего давления в выпускном коллекторе относительно давления в цилиндре ($p_{впр} < p$) и при меньшем давлении в цилиндре относительно давления во впускном коллекторе ($p < p_{вп}$), подающем газо-воздушную смесь, через впускной клапан в цилиндр поступает свежий заряд, а через выпускной удаляются выхлопные газы. Такой газообмен называют продувкой цилиндра. В период продувки цилиндров происходит незначительное перетекание исходной газо-воздушной смеси в выпускной коллектор. Об этом и свидетельствует наличие в выхлопных газах углеводородов СН при газодизельном режиме работы. В дизельном режиме работы перетекать может только воздух.

Дополнительно можно отметить, что по данным [15] на номинальном газодизельном режиме работы отмечается жесткое сгорание топлива. Отмечено увеличение эмиссии углеводородов СН и монооксида углерода СО. Большие выбросы СН особенно характерны для режимов работы газодизеля с малыми нагрузками и большим коэффициентом избытка воздуха. Это объясняется неполнотой сгорания газового топлива в газодизеле при работе на бедных смесях. На этих режимах отмечено и ухудшение топливной экономичности. Таким образом, результаты исследований показали целесообразность перехода на дизельный цикл на режимах малых нагрузок и холостого хода с целью уменьшения выбросов углеводородов и расхода топлива. Исследования также показали, что для улучшения показателей ра-

боты двигателя по газодизельному циклу необходимы оптимизация состава горючей смеси на всех режимах, управление моментом впрыскивания запальной дозы дизельного топлива, подбор и регулирование фаз газораспределения.

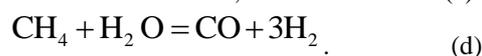
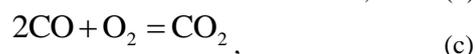
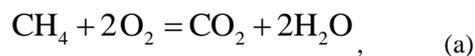
На рис. 3 приведено наглядное сравнение значений (данные табл. 6,7) концентраций СО в выхлопных газах при дизельном и газодизельном режимах работы двигателя КТА 50, карьерных самосвалов БелАЗ 75131 при максимальной нагрузке.

Из рис. 3 видно, что в газодизельном режиме содержание оксида углерода в выхлопных газах на исследованных в работе двигателях КТА 50 превышает его количество по отношению к дизельному режиму работы.

В [16] отмечено, что одним из недостатков природного газа при использовании его в газодизельном режиме является его уменьшенная скорость горения по сравнению со скоростью горения жидкого нефтяного топлива. В [17] указано, что скорость горения метана составляет до 0,8 м/с, а скорость взрывного горения метана составляет 500-700 м/с. Скорость горения зависит от концентрации горючего газа, температуры среды и других факторов.

М.Ф. Нагиев [18] показал, что при нормальном сгорании нефтяного топлива пламя распространяется со скоростью от 10-15 до 30-35 м/с, а при детонационном горении скорость распространения пламени от 1500 м/с до 2500 м/с.

В связи с этим можно предположить, что при уменьшенной скорости горения природного газа реакция горения на примере метана проходит как по основной реакции (а), так и последовательно через промежуточные реакции (b), (c) и (d):



В связи с этим можно утверждать, что в газодизельном режиме работы из-за уменьшенной скорости горения природного газа по сравнению со скоростью горения дизельного топлива, промежуточные реакции (b) и (d) с образованием монооксида углерода не успевают произойти до образования СО₂. При этом содержание диоксида углерода в составе отработавших газов в газодизельном режиме уменьшается, что подтверждают полученные результаты измерений, представленные далее (см. рис. 5).

Наименьшая концентрация СО в составе ОГ была зафиксирована на карьерных самосвалах БелАЗ 75131 с бортовыми номерами 3576 и 3642 при работе в газодизельном режиме (см. табл. 6,7 и рис. 3). Обращает на себя внимание тот факт, что содержание кислорода (О₂) в ВГ самосвалов 3327 и 3588 при работе в газодизельном режиме было выше по

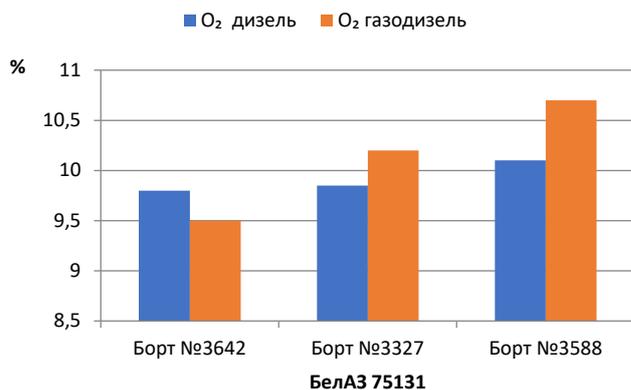


Рис. 4. Концентрации O_2 в выхлопных газах при дизельном и газодизельном режимах работы двигателя КТА 50, карьерных самосвалов БелАЗ 75131, при максимальной нагрузке
 Fig. 4. O_2 concentration in exhaust gases of KTA 50 engine of diesel and gas-and-diesel fuelled BelAZ 75131 mining dump trucks at maximum load

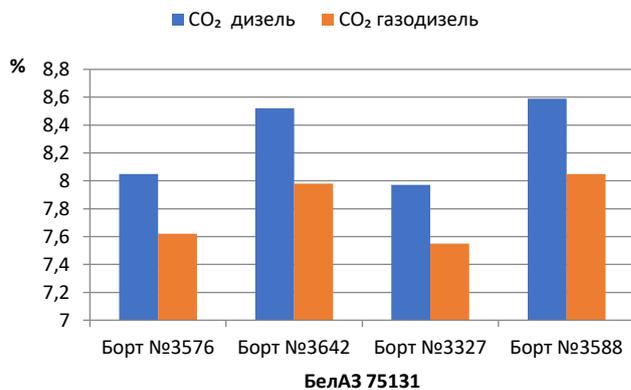


Рис. 5. Выбросы CO_2 при дизельном и газодизельном режимах работы двигателя КТА 50, карьерных самосвалов БелАЗ 75131, при максимальной нагрузке
 Fig. 5. CO_2 emissions from KTA 50 engine of diesel and gas-and-diesel fuelled BelAZ 75131 mining dump trucks at maximum load

сравнению с их работой в дизельном режиме. Вероятно, это обстоятельство связано с незавершенностью промежуточных реакций (b) и (d), ведущих к окислению CO в присутствии кислорода до образования CO_2 .

На рис. 4 приведено наглядное сравнение значений (данные табл. 6,7) концентраций O_2 в отработавших газах при дизельном и газодизельном режимах работы двигателя КТА 50, карьерных самосвалов БелАЗ 75131 при максимальной нагрузке.

Кроме указанной причины снижения концентрации CO_2 в ВГ при работе в газодизельном режиме (пояснение к рис. 3) следует обратить внимание на то, что в природном газе сохраняется сравнительно низкое относительное содержание углерода в метане – 75%. Для бензина этот показатель равен 85%, для дизельного топлива – 87%, что говорит о том, что при замещении дизельного топлива природным

газом равнозначного энергетического заряда произойдет снижение выбросов CO_2 . Из рисунка 5 видно, что снижение выбросов CO_2 при работе в газодизельном режиме произошло на 5-6%.

На рис. 5 приведено наглядное сравнение значений (данные табл. 6,7) выбросов CO_2 при дизельном и газодизельном режимах работы двигателя КТА 50, карьерных самосвалов БелАЗ 75131 при максимальной нагрузке.

Представленные в таблицах 6, 7 и на рисунках 2-5 данные свидетельствуют о том, что при работе в газодизельном режиме у всех карьерных самосвалов БелАЗ 75131, оснащенных дизельными двигателями КТА 50, наблюдается увеличение концентрации окиси углерода (CO) по сравнению с дизельным режимом работы. Концентрация CH в газодизельном режиме увеличилась незначительно и составила в среднем 40 ppm. Это говорит о том, что практически весь природный газ сгорает в цилиндрах двигателя. Значения концентрации O_2 незначительно изменялись в основном в большую сторону при газодизельном режиме работы. При «рваном» режиме работы (когда водитель нажимает педаль акселератора, а затем отпускает), характерном для прямых участков трассы, концентрация CH для карьерного самосвала с бортовым номером №3576 временно достигала 470 ppm, для №3642 – 320 ppm, для №3327 – 930 ppm, для №3588 – 890 ppm. Предположительно, такая разница в концентрациях CH возникла из-за разности в рельефах участков трассы. С уменьшением числа оборотов двигателя происходит увеличение в составе отработавших газов углеводородов CH в связи с увеличением времени периода продувки (период перекрытия клапанов). Выбросы CO при этом уменьшаются в результате увеличения времени на прохождения второй стадии химической промежуточной реакции (с).

При работе в газодизельном режиме происходит снижение выбросов CO_2 на 5-6% по отношению к дизельному режиму работы.

Как правило, процесс транспортировки горной массы осуществляется по технологическим трассам, имеющим различный рельеф: прямые участки, подъем и спуск с горы. По этой причине было важным проведение исследований выхлопных газов при спуске и подъеме в гору груженых и пустых карьерных самосвалов БелАЗ 75131, работающих как в дизельном, так и в газодизельном режимах.

В таблицах 8-9 представлены результаты измерений концентрации газов при движении в дизельном и газодизельном режимах карьерных самосвалов БелАЗ 75131 с бортовыми номерами №3588 и №3327 в

Таблица 8. Результаты замеров выхлопных газов в дизельном режиме работы при подъеме в гору пустых и груженых карьерных самосвалов БелАЗ 75131

Table 8. Results of measurements of exhaust gases of empty and laden diesel fuelled BelAZ 75131 mining dump trucks traveling uphill

Измеряемый компонент	Подъем в гору – дизельный режим работы двигателей КТА 50			
	Борт 3588		Борт 3327	
	груженный	пустой	груженный	пустой
СО, %	0,14	0,13	0,05	0,03
О ₂ , %	10,1	9,28	9,83	10,6
СО ₂ , %	8,59	8,83	8,18	7,25
СН, ppm	0	20	10	30
Обороты двигателя	1870	1930	1970	1920

Таблица 9. Результаты замеров выхлопных газов в газодизельном режиме работы при подъеме в гору пустых и груженых карьерных самосвалов БелАЗ 75131

Table 9. Results of measurements of exhaust gases of empty and laden gas-and-diesel fuelled BelAZ 75131 mining dump trucks traveling uphill

Измеряемый компонент	Подъем в гору – газодизельный режим работы двигателей КТА 50			
	Борт 3588		Борт 3327	
	груженный	пустой	груженный	пустой
СО, %	0,32	0,31	0,21	0,19
О ₂ , %	10,7	10,7	10,2	10,3
СО ₂ , %	8,05	7,97	7,55	7,12
СН, ppm	60	50	30	40
Обороты двигателя	1940	1940	1940	1930

Таблица 10. Результаты замеров выхлопных газов в дизельном режиме работы при спуске с горы пустых и груженых карьерных самосвалов БелАЗ 75131

Table 10. Results of measurements of exhaust gases of empty and laden diesel fuelled BelAZ 75131 mining dump trucks traveling downhill

Измеряемый компонент	Спуск с горы – дизельный режим работы двигателей КТА 50			
	Борт 3588		Борт 3327	
	груженный	пустой	груженный	пустой
СО, %	0,07	0,06	0,04	
О ₂ , %	19,3	19,2	18,2	
СО ₂ , %	2,48	1,54	3,73	
СН, ppm	0	10	10	
Обороты двигателя	1300			

Таблица 11. Результаты замеров выхлопных газов в газодизельном режиме работы при спуске с горы пустых и груженых карьерных самосвалов БелАЗ 75131

Table 11. Results of measurements of exhaust gases of empty and laden gas-and-diesel fuelled BelAZ 75131 mining dump trucks traveling downhill

Измеряемый компонент	Спуск с горы – газодизельный режим работы двигателей КТА 50			
	Борт 3588		Борт 3327	
	груженный	пустой	груженный	пустой
СО, %	0,21		0,17	0,16
О ₂ , %	19,1		19,2	19,1
СО ₂ , %	2,2		1,61	1,51
СН, ppm	470		380	340
Обороты двигателя	1300			

гору без груза и груженых. Число оборотов двигателя при этом менялось от 1870 до 1940 об/мин.

Как видно из табл. 8- 9, при движении в гору в дизельном и газодизельном режимах груженых самосвалов концентрация компонентов в отработавших газах практически не изменяется в сравнении с движением в гору пустого самосвала. У карьерного

самосвала с бортовым номером №3588 концентрация СО показала большее значение, чем у других самосвалов при практически одинаковых режимах работы двигателя.

В табл.10-11 представлены концентрации компонентов выхлопных газов при движении в дизельном и газодизельном режимах карьерных самосвалов БелАЗ 75131 с бортовыми номерами № 3588 и №3327

Таблица 12. Средневзвешенные выбросы вредных веществ с выхлопными газами двигателей КТА 50 карьерных самосвалов БелАЗ 75131

Table 12. Weighted average emissions of harmful substances with exhaust gases of KTA 50 engines of BelAZ 75131 mining dump trucks

Компонент	Дизельный режим				Норма выбросов	Газодизельный режим			
	Номера бортов карьерных самосвалов					Номера бортов карьерных самосвалов			
	3576	3642	3327	3588		3576	3642	3327	3588
CO	1,47	1,76	2,06	4,11	3,0	4,70	5,29	6,17	9,40
CO ₂	371,70	393,40	368,00	396,63	–	351,84	368,47	348,61	371,70
CH	1,45E-04	0	1,45E-04	0	1,0	5,81E-04	5,81E-04	4,36E-04	8,72E-04

при спуске с горы груженых и без груза. Число оборотов двигателя во всех случаях составляло 1300 об/мин.

Как показали результаты проведенных исследований (таблица 10- 11) разница в концентрациях для груженых и пустых карьерных самосвалов при движении на спуске в дизельном и газодизельном режиме работы не существенна. Концентрация СН в газодизельном режиме менялась в диапазоне от 100 до 470 ppm.

В таблице 12 представлен расчет выброса компонентов из состава ВГ при работе в дизельном и газодизельном режимах при номинальной нагрузке, осуществляемой при движении в гору в груженом состоянии. Эти данные относятся к тому времени работы, когда самосвал работает несколько секунд (30-40 с) в наиболее напряженном состоянии. Расчет проведен по формуле (2) по значениям, предоставленным в таблицах 5-7. Численные значения выбросов представлены в г/(кВт·ч).

Из табл. 12 видно, что выбросы по СО при работе в дизельном режиме превышают нормативные по ЕВРО-5 только двигателя борта № 3588. В газодизельном режиме у всех исследованных двигателей наблюдается превышение выбросов по СО. Выбросы по СН незначительны по сравнению с нормативными у всех двигателей.

В ГОСТ Р 54942-2012 отмечено, что четырехканальные газоанализаторы должны иметь программное обеспечение, позволяющее рассчитывать коэффициент избытка воздуха α по формуле:

$$\alpha = \frac{[\text{CO}_2] + \frac{[\text{CO}]}{2} + [\text{O}_2] + \left(\frac{H_{cv}}{4} \cdot \frac{3,5}{3,5 + \frac{[\text{CO}]}{[\text{CO}_2]}} - \frac{O_{cv}}{2} \right) ([\text{CO}_2] + [\text{CO}])}{\left(1 + \frac{H_{cv}}{4} - \frac{O_{cv}}{2} \right) ([\text{CO}_2] + [\text{CO}] + (K_i [\text{CH}]))} \quad (4)$$

где $[\text{CO}_2]$, $[\text{CO}]$, $[\text{O}_2]$ – объемная доля диоксида, оксида углерода и кислорода соответственно, %;

СН – объемная доля углеводородов в пересчете на гексан, млн⁻¹;

H_{cv} – отношение числа атомов водорода к числу атомов углерода (для сжиженного нефтяного газа (СНГ) равно 2,53; для КПГ и СПГ – 4,0; для бензина – 1,73);

O_{cv} – отношение числа атомов кислорода к числу атомов углерода (для СНГ, КПГ и СПГ равно нулю, для бензина - 0,02);

K_1 – поправочный коэффициент для пересчета углеводородов, измеренных инфракрасным методом, на гексан $[6 \cdot 10^{-4}]$, если сумма углеводородов выражена в объемных долях (млн⁻¹) гексана; значение может быть уточнено изготовителем прибора].

Время установления выходного сигнала (показаний), с, не должно превышать: 30 – для каналов измерения СО, СО₂, и СН; 60 – для канала измерения О₂.

Расчет по формуле (4) коэффициента избытка воздуха в расчете на работу двигателей в номинальном режиме показал, что $\alpha = 1,6-1,66$ соответствовало режиму, как в дизельном, так и в газодизельном режимах работы дизельных двигателей КТА 50 карьерных самосвалов БелАЗ 75131.

Коэффициент избытка воздуха при работе карьерного самосвала с бортовым номером №3327 на спуске в груженом состоянии по дизельному циклу имел значение 3,4. Необходимо отметить, что в газодизельном режиме α варьировало от 2,2 до 6,6. Вероятно, это связано с движением карьерных самосвалов БелАЗ 75131 на участках горных выработок, имеющих неблагоприятное дорожное покрытие, обусловленное выпавшими осадками, приведшими к глинистому вязкому покрытию на технологических трассах.

Заключение

Результаты проведенных исследований состава выхлопных газов дизельных двигателей КТА 50 карьерных самосвалов БелАЗ 75131, работающих в дизельном и газодизельном режимах, позволили сформулировать следующие выводы:

1. При эксплуатации в газодизельном режиме карьерных самосвалов БелАЗ 75131, оснащенных дизельными двигателями КТА 50, происходит снижение вредных выбросов диоксида углерода (СО₂) в среднем на 5-6%. Это, очевидно, объясняется сравнительно низким относительным содержанием углерода (75%) в природном газе метан по отношению к дизельному топливу, где содержание углерода составляет 87%. Это в свою очередь говорит о том, что при замещении дизельного топлива природным газом равнозначного энергетического заряда происходит снижение выбросов по СО₂.

2. Незначительно увеличиваются значения концентрации кислорода (O_2) при работе карьерных самосвалов в газодизельном режиме.

3. Присутствие в выхлопных газах углеводородов (СН) объясняется тем, что в периоды перекрытия клапанов происходит выход части газо-воздушной смеси из полости цилиндра в выпускной коллектор. Наличие не прореагировавшего топлива в виде углеводородов СН в выхлопных газах может быть, вероятно, от подачи топливной газо-воздушной смеси при работе двигателя в газодизельном режиме.

4. При снижении числа оборотов двигателя происходит рост содержания в составе выхлопных газов углеводородов (СН) по причине увеличения времени периода продувки (период перекрытия клапанов). Выбросы СО при этом уменьшаются в результате увеличения времени на прохождения второй стадии химической промежуточной реакции (с).

5. Концентрация СН в газодизельном режиме работы карьерных самосвалов увеличивалась незначительно и составила в среднем 40 ppm. Это говорит о том, что практически весь природный газ сгорает в цилиндрах двигателя.

6. Средневзвешенные выбросы вредных веществ по углеводородам (СН) незначительны по сравнению с нормативными по ЕВРО-5 у всех дизельных двигателей КТА 50.

7. В газодизельном режиме у всех исследованных двигателей КТА 50 наблюдалось превышение средневзвешенных вредных выбросов монооксида углерода (СО). Средневзвешенные выбросы по СО при работе в дизельном режиме двигателей КТА 50 не превышали нормативные показатели по ЕВРО-5, за исключением двигателя карьерного самосвала БелАЗ 75131 с бортовым №3588, что, очевидно, связано с технической неисправностью в настройках и работе двигателя.

При максимальной нагрузке (движении в гору) в дизельном и газодизельном режимах груженых самосвалов концентрация компонентов (CO_2 , СН, СО, O_2) в выхлопных газах практически не изменяется в сравнении с движением в гору пустого карьерного самосвала.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Dubov G.M., Trukhmanov D.S., Chegoshv A.A., Ashikhmin V.E. Substantiation of the need to create an eccentric cycloidal gearing transmission of geokhod // IIIth International Innovative Mining Symposium: E3S Web Conferences. 41, 03008 (2018). DOI: 10.1051/e3sconf/20184103008.

2. Хазин М.Л., Тарасов А.П. Эколого-экономическая оценка карьерных троллейбусов // Вестник Пермского национального исследовательского университета. Геология. Нефтегазовое и горное дело. 2018. Т. 17, № 2. С. 66–80. DOI: 10.15593/2224-9923/2018.2.6.

3. 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: 10.15593/2224-9923/2019.1.5.

4. Чернецов Д.А. Токсичность отработавших газов дизелей и их антропогенное воздействие. // Вопросы современной науки и практики. Университет им. В.И. Вернадского. 2010. №10-12(31). С. 54-59.

5. Dubov G.M., Trukhmanov D.S., Nokhrin S.A., Sergel A.N. Development of technical requirements for on-board cryogenic fuel systems of BelAZ dump trucks // X International Scientific and Practical Conference «INNOVATIONS IN MECHANICAL ENGINEERING» (ISPCIME 2019): MATEC Web of Conferences. 297, 03002 (2019). DOI: 10.1051/matecconf/201929703002.

6. И.В. Кузнецов, И.А. Паначев, Г.М. Дубов, С.А. Нохрин. Энергетическая оценка эксплуатации газодизельных карьерных самосвалов БелАЗ-75131 на разрезах Кузбасса // «Справочник. Инженерный журнал» // 2019. №4(265). С. 19 - 23. DOI: 10.14489/hb.2019.04.pp.019-023.

7. 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// Vth International Innovative Mining Symposium: E3S Web of Conferences. 174, 03010 (2020). DOI: 10.1051/e3sconf/202017403010.

8. Dubov G.M., Trukhmanov D.S., Nokhrin S.A. The use of alternative fuel for heavy-duty dump trucks as a way to reduce the anthropogenic impact on the environment // INTERNATIONAL MULTICONFERENCE ON INDUSTRIAL ENGINEERING AND MODERN TECHNOLOGIES (FarEastCon-2019): IOP Conf. Series: Earth and Environmental Science. 459, 042059 (2020). DOI: 10.1088/1755-1315/459/4/042059.

9. 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 // IVth International Innovative Mining Symposium: E3S Web of Conferences. 105, 03019 (2019). DOI:10.1051/e3sconf/201910503019.

10. Dubov G.M., Trukhmanov D.S., Nokhrin S.A., Sergel A.N. Method for installing cryogenic fuel tanks on the deck of BelAZ 7513 mining dump truck // Vth International Innovative Mining Symposium: E3S Web of Conferences. 174, 03016 (2020). DOI: 10.1051/e3sconf/202017403016.

11. Nohrin S.A., Dubov G.M., Trukhmanov D.S., Patent 2701133 (The Russian Federation, 2019).

12. 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 // «INNOVATIONS IN MECHANICAL ENGINEERING» (ISPCIME 2019): MATEC Web

of Conferences. 297, 03001 (2019). DOI: 10.1051/mateconf/201929703001.

13. Dubov G.M., Trukhmanov D.S., Kuznetsov I.V., Nokhrin S.A., Sergel A.N. Prospects for the use of liquefied natural gas as a motor fuel for haul trucks // IVth International Innovative Mining Symposium: E3S Web of Conferences 105, 03018 (2019). DOI: 10.1051/e3sconf/201910503018.

14. Луканин В.Н., Морозов К.А., Хачиян А.С. Двигатели внутреннего сгорания // В 3 кн. Кн. 1. Теория рабочих процессов // М.: Высш. шк. 1995. 368 с.

15. Нигматулин И. Д. Исследование эксплуатационно-технологических показателей работы сельскохозяйственных тракторов, оснащенных газобаллонным оборудованием: дис. ... канд.

техн. наук: 05.20.03 / Ильдар Дагиевич Нигматулин. Саратов, 2014. 164 с. Библиогр. С. 131-148.

16. РД 03112194-1095-03. Руководство по организации эксплуатации газобаллонных автомобилей, работающих на компримированном природном газе. – Взамен: РД-200-РСФСР-12-0185-87, МУ-200-РСФСР-12-0163-87, МУ-200-РСФСР-12-0016-84, МУ-200-РСФСР-17-0229-89, Р 3107938-0252-88. 2003. 35 с.

17. Морев А.И., Ерохов В.И., Бекетов Б.А. Газобаллонные автомобили: Справочник // М.: Транспорт, 1992.

18. Нагиев, М. Ф. Химия, технология и расчет процессов синтеза моторных топлив: в 2-х Т. // Баку: Изд-во Акад. наук АзССР, 1961. Т. 1. 1961. 368 с. Т. 2. 1961. 371 с.

Aleksandr R. Bogomolov^{1,2,*}, Dr. Sc. in Engineering, Associate Professor, **Sergey S. Azikhanov^{1,2}**, C. Sc. in Engineering, Associate Professor, **Georgiy M. Dubov¹**, C. Sc. in Engineering, Associate Professor, **Elena A. Grigorieva¹**, in Engineering, Senior Lecturer, **Sergey A. Nokhrin³** in Engineering, Deputy General Director for Gasification of Motor Transport

¹T.F. Gorbachev Kuzbass State Technical University, 28, Vesennyya St., Kemerovo, 650000, Russian Federation

²Kutateladze Institute of Thermophysics SB RAS, 1, Academician Lavrentyev Prospect, Novosibirsk, Russian Federation

³«TekhnoEco» LLC, 11 Azovskaya St., Prokopyevsk, Russian Federation

*E-mail: barom@kuzstu.ru

STUDY OF THE COMPOSITION OF EXHAUST GAS OF DUAL-FUEL GAS-DIESEL BELAZ 75131 MINING DUMP TRUCKS

Abstract: the state of the issue on a comparative study of the composition of exhaust gases of KTA 50 engines of diesel and gas-and-diesel fuelled BelAZ 75131 mining dump trucks hauling rock mass is considered. A brief analysis on the demand and operating conditions for this type of mining dump trucks, as well as world experience in converting off-road equipment to liquefied natural gas operation is carried out. It is noted that the use of alternative fuel sources appears to be one of the most promising ways to reduce the impact of heavy duty haulage truck operation on the environment. The research methods are presented. The data on the maximum permissible values of specific weighted average emissions of harmful substances, as well as the values of the correction factors, fuel composition factor values, the results of measurements in stationary conditions of the consumption of antifreeze and air supplied to the cylinder of diesel fuelled KTA 50 internal combustion engine at idle are presented. The obtained data on the comparison of the concentration of CH, CO, O₂ and CO₂ during operation (empty and laden dump trucks going uphill and downhill) of diesel and gas-and-diesel fuelled BelAZ 75131 dump trucks are described and substantiated. The results of calculating the weighted average emissions of harmful substances with exhaust gases of KTA 50 diesel engines of BelAZ 75131 mining dump trucks; the results of calculating the excess air coefficients α are presented. The details of the conditions of the measurements are given and brief conclusions are drawn.

Keywords: mining dump truck, exhaust gases, liquefied natural gas, diesel fuel, gas-diesel operation.

Article info: received February 05, 2021

DOI: 10.26730/1816-4528-2021-2-30-41

REFERENCES

1. Dubov G.M., Trukhmanov D.S., Chegoshv A.A., Ashikhmin V.E. Substantiation of the need to create an eccentric cycloidal gearing transmission of

geokhod // IIIth International Innovative Mining Symposium: E3S Web Conferences. 41, 03008 (2018). DOI: 10.1051/e3sconf/20184103008.

2. Khazin M.L., Tarasov A.P. Eco-economic assessment of open-pit trolleys // Bulletin of the Perm National Research University. Geology. Oil, gas and mining. 2018. Vol. 17, N 2. pp. 66–80. DOI: 10.15593/2224-9923/2018.2.6.
3. Khazin M.L. Conversion of mining dump trucks to gas operation in the north // Bulletin of the Perm National Research University. Geology. Oil, gas and mining. 2019. Vol.19, N 1. pp. 56-72. DOI: 10.15593/2224-9923/2019.1.5.
4. Chernetsov D.A. Diesel exhaust gas toxicity and their anthropogenic impact // Issues of modern science and practice. .N. Vernadsky University. 2010. №10-12(31). С. 54-59.
5. Dubov G.M., Trukhmanov D.S., Nokhrin S.A., Sergel A.N. Development of technical requirements for on-board cryogenic fuel systems of BelAZ dump trucks // X International Scientific and Practical Conference «INNOVATIONS IN MECHANICAL ENGINEERING» (ISPCIME 2019): MATEC Web of Conferences. 297, 03002 (2019). DOI: 10.1051/mateconf/201929703002.
6. Kuznetsov I.V., Panachev I.A., Dubov G.M., Nohrin S.A. Energy evaluation of the operation of gas and diesel dump trucks BelAZ – 75131 on the cuts of Kuzbass // Handbook. An Engineering journal, 4, 265(2019).DOI: 10.14489/hb.2019.04. pp. 019-023.
7. 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 // Vth International Innovative Mining Symposium: E3S Web of Conferences. 174, 03010 (2020). DOI: 10.1051/e3sconf/202017403010.
8. Dubov G.M., Trukhmanov D.S., Nokhrin S.A. The use of alternative fuel for heavy-duty dump trucks as a way to reduce the anthropogenic impact on the environment // INTERNATIONAL MULTICONFERENCE ON INDUSTRIAL ENGINEERING AND MODERN TECHNOLOGIES (FarEastCon-2019): IOP Conf. Series: Earth and Environmental Science. 459, 042059 (2020). DOI: 10.1088/1755-1315/459/4/042059.
9. 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 eval-

- uation // IVth International Innovative Mining Symposium: E3S Web of Conferences. 105, 03019 (2019). DOI: 10.1051/e3sconf/201910503019.
10. Dubov G.M., Trukhmanov D.S., Nokhrin S.A., Sergel A.N. Method for installing cryogenic fuel tanks on the deck of BelAZ 7513 mining dump truck // Vth International Innovative Mining Symposium: E3S Web of Conferences. 174, 03016 (2020). DOI: 10.1051/e3sconf/202017403016.
11. Nohrin S.A., Dubov G.M., Trukhmanov D.S., Patent 2701133 (The Russian Federation, 2019).
12. 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 «INNOVATIONS IN MECHANICAL ENGINEERING» (ISPCIME 2019): MATEC Web of Conferences. 297, 03001 (2019). DOI: 10.1051/mateconf/201929703001.
13. Dubov G.M., Trukhmanov D.S., Kuznetsov I.V., Nokhrin S.A., Sergel A.N. Prospects for the use of liquefied natural gas as a motor fuel for haul trucks // IVth International Innovative Mining Symposium: E3S Web of Conferences 105, 03018 (2019). DOI: 10.1051/e3sconf/201910503018.
14. Lukanin V.N., Morozov K.A., Khachiyan A.S. Internal combustion engines. Work process theory // Moscow: Higher education. 1995. 368 p.
15. Nigmatulin I.D. Study of operational and technological indicators of agricultural tractors equipped with gas equipment: Ph.D. thesis / Ildar Dagievich Nigmatulin. Saratov, 2014. 164 p.
16. RD 03112194-1095-03. Guideline for the organization of operation of compressed natural gas vehicles. – In supersession of RD-200-RSFSR-12-0185-87, MU-200-RSFSR-12-0163-87, MU-200-RSFSR-12-0016-84, MU-200-RSFSR-17-0229-89, R 3107938-0252-88. 2003. 35 p.
17. Morev A.I., Erokhov V.I., Beketov B.A. Gas vehicles: A Handbook // Moscow: Transport, 1992.
18. Nagiev M.F. Chemistry, technology and calculation of the synthesis of motor fuels // Baku: Publishing House of the Academy of Sciences of the Azerbaijan SSR, 1961. Vol. 1. 1961. 368 p. Vol. 2. 1961. 371 p.

Библиографическое описание статьи

Богомолов А.Р., Азиханов С.С., Дубов Г.М., Григорьева Е.А., Нохрин С.А. Исследование состава выхлопных газов карьерных самосвалов БелАЗ 75131, работающих в дизельном и газодизельном режимах // Горное оборудование и электромеханика – 2021. – № 2 (154). – С. 30-41.

Reference to article

Bogomolov A.R., Azikhanov S.S., Dubov G.M., Grigorieva E.A., Nokhrin S.A. Study of the composition of exhaust gas of dual-fuel gas-diesel BelAZ 75131 mining dump trucks. Mining Equipment and Electromechanics, 2021, no.2 (154), pp. 30-41.