

Дубов Георгий Михайлович¹, кандидат технических наук, доцент, **Богомолов Александр Романович**^{1,2,*}, доктор технических наук, доцент, **Азиханов Сергей Сейфудинович**^{1,2}, 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: nikokem@mail.ru

ИССЛЕДОВАНИЕ РАСХОДНЫХ И ТЕМПЕРАТУРНЫХ ХАРАКТЕРИСТИК КАРЬЕРНЫХ САМОСВАЛОВ БЕЛАЗ-75131, РАБОТАЮЩИХ В ГАЗОДИЗЕЛЬНОМ РЕЖИМЕ

***Аннотация:** рассматривается вопрос по сравнительному исследованию расходных и температурных характеристик карьерных самосвалов БелАЗ-75131, оснащенных криогенной бортовой топливной системой (КБТС) и осуществляющих транспортировку горной массы в газодизельном режиме на угольном разрезе Кузбасса. Проводится краткий анализ по эффективности использования на карьерных самосвалах в качестве моторного топлива сжиженного природного газа (СПГ) – метана. Отмечается, что в сегменте тяжелого карьерного транспорта использование газомоторного топлива представляется одним из перспективных путей повышения эколого-экономических показателей при эксплуатации данного вида карьерной техники. Приведена методика и приборная база для проведения исследований. Исследована связь между натуральными соотношениями замещения дизельного топлива природным газом и энергетическим зарядом этих замещений. Представлены: данные по расходу парообразного (газообразного перегретого) природного газа (далее – газообразный природный газ) в процессе эксплуатации в производственных условиях газодизельных карьерных самосвалов БелАЗ-75131; скорость движения газообразного природного газа в трубопроводах; расход тосола на входе в испаритель сжиженного природного газа, а также температуры тосола на входе и выходе из испарителя; температура газообразного природного газа на выходе из редуктора после испарителя; данные по сравнению профилей температур в цилиндрах при эксплуатации двигателя внутреннего сгорания (ДВС) CUMMINS KTA 50 на дизельном и газодизельном топливах.*

***Ключевые слова:** БелАЗ, карьерный самосвал, сжиженный природный газ, газодизельный режим работы, криогенная бортовая топливная система, испаритель.*

***Информация о статье:** принята 31 мая 2021 г.
DOI: 10.26730/1816-4528-2021-3-20-31*

Введение

Крупным потребителем топливно-энергетических ресурсов является транспорт, на долю которого приходится около 13% [1]. Преобладающим типом энергетических установок на наземном и водном транспорте являются поршневые ДВС, использующие жидкое нефтяное топливо. На грузовом автомобильном транспорте удельный расход жидкого нефтяного топлива ежегодно сокращается. Это происходит за счет модернизации транспорта посредством внедрения новых высокоэффективных ДВС, эксплуатирующихся на альтернативных энергоносителях [2]. Тем не менее, проблема экономии жидких нефтяных энергоносителей остается одной из самых острых.

Россия располагает большими запасами высококачественного моторного топлива, не требующего

для использования в двигателях никакой химической переработки. Таким топливом прежде всего является природный газ. Как моторное топливо природный газ в натуральном виде превосходит нефтяное топливо. В транспортных ДВС обеспечиваются высокие технико-экономические показатели, так как природный газ имеет хорошие антидетонационные качества, благоприятные условия смесеобразования и широкие пределы воспламенения в смеси с воздухом.

Природный газ в основном состоит из метана с примесями других углеводородов и инертных газов. В 80-х годах прошлого столетия итальянская фирма «Тессари» одной из первых переоборудовала дизельный двигатель мощностью 100 кВт для работы по газодизельному циклу. Испытания проводились

при расходе дизельного топлива 20% и природного газа – 80% при номинальной нагрузке [1].

Качества газа как моторного топлива могут быть распределены по трем группам:

– моторные качества (свойства, определяющие протекание сгорания и всего рабочего процесса двигателя);

– свойства, определяющие работу топливной аппаратуры автотранспортного средства;

– свойства, определяющие условия приготовления топлива и доставки его до потребителя.

Главными, определяющими целесообразность и эффективность газового моторного топлива, являются качества первой группы. Но и другие качества немаловажны, так как они определяют конструктивные и технологические решения. Моторное качество топлива определяют по энергетическим показателям газа, которые в основном зависят от теплоты сгорания.

На практике природный газ как моторное топливо используется в сжатом или сжиженном состоянии. Основными потребителями сжатого природного газа (СПГ) выступают легковой транспорт, пассажирский, легкий грузовой. Основными потребителями сжиженного природного газа (СПГ) являются водный, магистральный автомобильный транспорт, сельскохозяйственная и карьерная техника [3-8].

Рост мирового потребления и соответственно объемов добычи полезных ископаемых открытым способом приводит к очевидному росту потребности у горнодобывающих компаний в карьерной технике, обеспечивающей высокие экономические и экологические показатели [9]. Усложнение условий эксплуатации карьерной техники, связанной с увеличением производительности горных работ, обуславливает увеличение ее концентрации в ограниченном пространстве, а значит, и увеличение поступлений вредных веществ, находящихся в выхлопных газах, в атмосферу. Интенсификация объемов открытых горных работ приводит к повышению потребления дизельного топлива карьерными самосвалами. Ежегодно потребляются миллионы тонн дизельного топлива, причем 70-80% общего объема топлива потребляют груженные самосвалы на подъемах при малой скорости движения. Это приводит к значительному выбросу в атмосферу вредных веществ, в том числе CO₂, являющегося одним из основных парниковых газов, участвующих в глобальном потеплении Земли [3, 10].

Основным видом технологического транспорта для перевозки горной массы являются карьерные самосвалы [11]. В России наибольшее распространение получили карьерные самосвалы БелАЗ с дизельными ДВС. Автопарки горнодобывающих компаний, ведущих разработку полезных ископаемых открытым способом, в основном оснащены карьерными самосвалами модели БелАЗ-75131 и их модификациями [12-13].

С учетом возрастающих эколого-экономических требований, предъявляемых к добыче полезных ис-

копаемых открытым способом, все чаще реализуются проекты по созданию новой (экологичной и экономичной) и модернизации имеющейся горной техники [2]. Одним из таких проектов является успешно реализованный проект по модернизации карьерных самосвалов БелАЗ для обеспечения их работы по газодизельному циклу. Проект реализован компаниями: 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 модернизированы для работы по газодизельному циклу и успешно введены в эксплуатацию 60 карьерных самосвалов БелАЗ-5131 с ДВС CUMMINS KTA 50 [14-17].

Учитывая новизну и практическую ценность реализованного проекта, а также отсутствие до настоящего времени исследований, направленных на выявление ключевых эксплуатационных показателей работы карьерных самосвалов БелАЗ-75131, эксплуатирующихся в газодизельном режиме, назрел вопрос по их проведению. В этой связи целью представленной работы является исследование и сравнительный анализ расходных и температурных характеристик ДВС CUMMINS KTA 50 карьерных самосвалов БелАЗ-75131, оснащенных криогенной бортовой топливной системой.

Методика проведения исследований

В стационарных и производственных условиях измерения и сравнительный анализ расходных и температурных характеристик ДВС CUMMINS KTA 50 карьерного самосвала БелАЗ-75131, оснащенного криогенной бортовой топливной системой (далее – двигатель БелАЗ), проводились в диапазоне оборотов двигателя 650-1950 об/мин. В процессе проведения исследований при различных условиях эксплуатации проводилась фиксация следующих параметров: суммарный расход, а также расход по правому и левому ряду цилиндров ДВС газообразного природного газа; скорость газообразного природного газа в трубопроводе после форсунок; расход теплоносителя (тосола) на входе в испаритель; температура тосола на входе и выходе из испарителя; средняя скорость воздуха в правом и левом трубопроводе; температура газообразного природного газа на выходе из редуктора после испарителя; температуры в цилиндрах при работе ДВС CUMMINS KTA 50 на дизельном и газодизельном топливах.

Расход тосола определялся ультразвуковым расходомером «Portaflow 220А», а его температура на входе и выходе из испарителя – датчиками температуры. Скорости движения воздуха в левом и правом трубопроводах определялись с использованием дифференциального манометра TESTO-512 и трубка Пито-Прандтля. Для измерения температур выходящих из цилиндров газов, отражающих рабочую температуру в цилиндрах ДВС CUMMINS KTA 50 карьерных самосвалов БелАЗ-75131, использовались стандартные термпары.

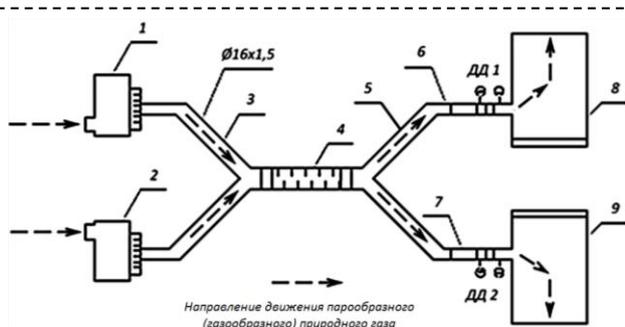


Рис. 1. Схема подачи газообразного природного газа от реек форсунок в воздухозаборные каналы ДВС CUMMINS KTA 50

Fig. 1. Diagram of the supply of gaseous natural gas from the injector racks to the air intakes of CUMMINS KTA 50 internal combustion engine

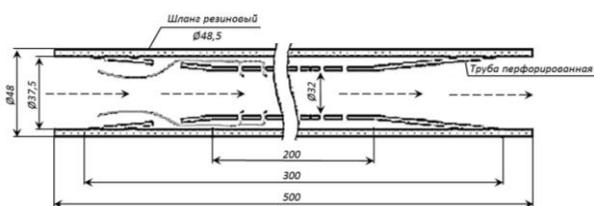


Рис. 2. Демпфер – гаситель пульсаций давлений газообразного природного газа

Fig. 2. Gaseous natural gas pressure pulsation damper

На каждый канал подачи газообразного природного газа были установлены изготовленные авторами газовые расходомеры 6,7 с электронным блоком для определения мгновенного расхода природного газа [8]. Далее пройдя дифференциальные манометры ДД1, ДД2 (TESTO-512) с трубками Пито-Прандтля, газ попадал в воздухозаборные каналы 8,9 правого и левого ряда цилиндров ДВС CUMMINS KTA 50. Схема подключения представлена на рис. 1. Для обеспечения качественного измерения расхода после реек форсунок 1,2 устанавливался демпфер – гаситель пульсаций давления газа 4 (рис. 2).

Результаты и обсуждения

На первоначальном этапе проведения исследований обязательным и необходимым условием являлось определение связи между соотношениями замещения дизельного топлива природным газом и энергетическим зарядом этих замещений. Это обусловлено, прежде всего, технико-экономическими соображениями, с точки зрения оптимального (необходимого и достаточного) объема подачи природного газа в ДВС CUMMINS KTA 50 в процессе эксплуатации карьерного самосвала при обеспечении исключения потерь его мощности. Также определение необходимого и достаточного объема природного газа позволяет исключить потери газа вследствие недогорания в случае его переизбытка в камере сгорания, а также минимизировать перегрев ДВС CUMMINS KTA 50 в процессе его эксплуатации.

В табл.1 и на рис.3 представлена связь между натуральными (массовыми или объемными) соотношениями замещения дизельного топлива природным газом и энергетическим зарядом этих замещений.

Как показывают данные, представленные в табл. 1 и на рис. 3, одно и то же энергетическое замещение соответствует натуральному замещению, равному 1,0. В этом случае происходит адекватная замена по энергетическому заряду дизельного топлива природным газом. Можно с уверенностью говорить о том, что ДВС CUMMINS KTA 50 будет работать в соответствии с режимом дизельного цикла и иметь технико-экономические показатели работы, соответствующие паспортным данным. Иными словами, опираясь на критерий – энергетический заряд, при эксплуатации ДВС CUMMINS KTA 50 в газодизельном режиме один литр дизельного топлива необходимо и достаточно замещать одним метром кубическим природного газа. Данные, представленные в табл. 1 и на рис. 3, также говорят о том, что при соотношении замещения менее 1,0 двигатель будет работать на обедненной смеси, а при соотношении более 1,0 – на богатой смеси при штатной работе воздушной турбины. В первом случае это приведет к потере мощностных характеристик двигателя, а во втором будет происходить значительный перерасход природного газа и, как следствие, снижение технико-экономических показателей эксплуатации карьерных самосвалов.

Таблица 1. Связь между натуральными соотношениями замещения дизельного топлива (ДТ) природным газом (ПГ) и энергетическим зарядом этих замещений

Table 1. The relationship between the natural ratio of diesel fuel (DF) replacement with natural gas (NG) and the energy charge of these replacements

Время работы, час.	Расход дизтоплива, л		Замещение дизтоплива натуральное Δ , л	Расход газового топлива		Натуральное соотношение, м^3 газа/л ДТ	Доля замещения ДТ	Энергетический заряд топлив при замещении, МДж		
	расчетный	действительный		кг	л			ПГ	ДТ	
22	2354	1600	-754	358	494	0,7	0,32	24,50	35,28	
Пример 1 по натуральному и энергетическому замещению							1,0		35,00	35,00
Пример 2 по натуральному и энергетическому замещению							1,3		45,00	35,00
Пример 3 по натуральному и энергетическому замещению							1,7		59,5	35,00

Таблица 2. Результаты измерений расходных характеристик ДВС CUMMINS KTA 50 в стационарных условиях

Table 2. The results of measurements of consumption characteristics of CUMMINS KTA 50 internal combustion engine in stationary conditions

№ п/п	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
1.	холостой ход	650	46,08	0,000768	3,81	3,98
2.	холостой ход	1000	71,67	0,0011944	5,30	5,53
3.	холостой ход	1950	124	0,0020667	11,60	11,73

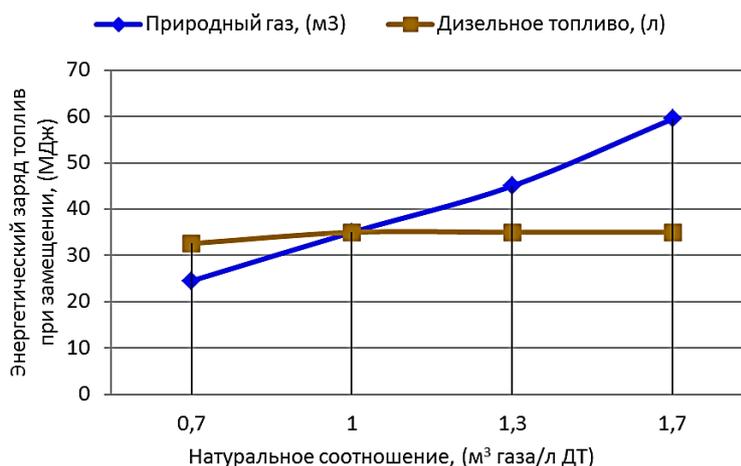


Рис. 3. Связь между натуральными соотношениями замещения дизельного топлива газообразным природным газом и энергетическим зарядом этих замещений
Fig. 3. Relationship between natural ratios of diesel fuel replacement with gaseous natural gas and the energy charge of these replacements

В табл. 2 представлены измеренные на холостом ходу значения расхода тосола, проходящего через испаритель, а также скорости движения воздуха в левом и правом трубопроводах, при которых он подается в турбину. На рис. 4,5 представлены данные об изменениях расхода тосола в испарителе и скорости движения воздуха в трубопроводах при изменении числа оборотов ДВС CUMMINS KTA 50.

Как показали результаты проведенных измерений, при увеличении числа оборотов ДВС CUM-

MINS KTA 50 с 650 до 1950 об/мин пропорционально возрастает как расход проходящего через испаритель тосола с 46,08 до 124 л/мин, так и средняя скорость воздуха в правом с 3,81 до 11,6 м/с и левом с 3,98 до 11,73 м/с трубопроводах, при которых он подается в турбину. Необходимо отметить, что скорости воздуха как в левом, так и в правом трубопроводах практически не отличались по своим значениям.

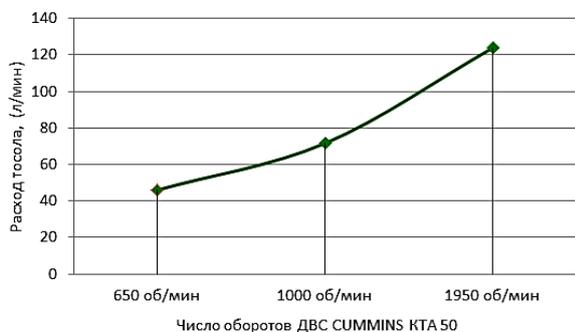


Рис. 4. Расход тосола в зависимости от числа оборотов ДВС CUMMINS KTA 50
Fig. 4. Antifreeze consumption depending on the speed of CUMMINS KTA 50 internal combustion engine

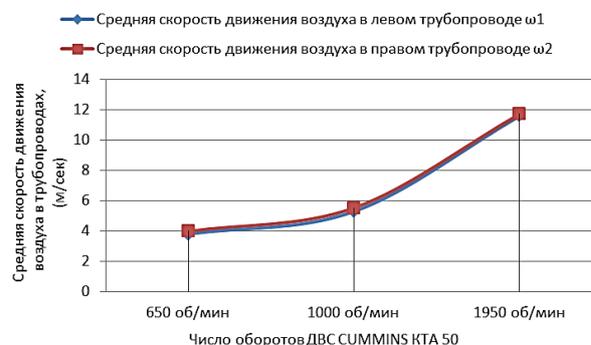


Рис. 5. Скорости движения воздуха в левом и правом трубопроводах ДВС CUMMINS KTA 50
Fig. 5. Air velocities in the left and right pipelines of CUMMINS KTA 50 internal combustion engine

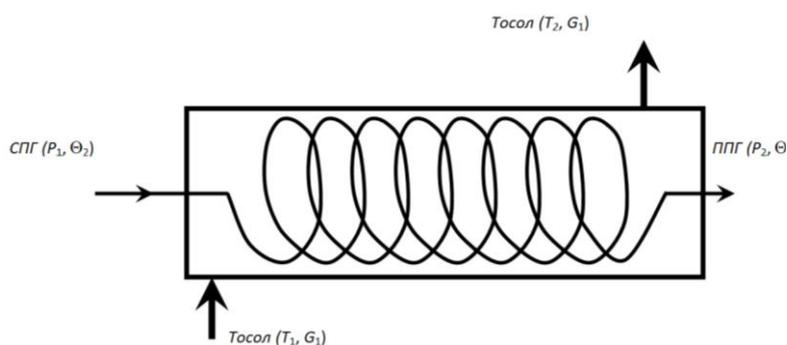


Рис. 6. Схема потоков теплоносителя (тосола) и сжиженного природного газа (СПГ), реализуемые в испарителе
 Fig. 6. Scheme of coolant (antifreeze) and liquefied natural gas (LNG) flows in the evaporator

рис. 6 представлена схема потоков, реализуемая в испарителе.

По результатам измеренных параметров определялось количество теплоты, переданное от тосола СПГ по уравнению:

$$Q_1 = G_1 c_{p1} (T_1 - T_2) = 1,378 \cdot 3,82(366,89 - 365,84) = 5,527 \text{ кВт}; \quad (1)$$

Термодинамические параметры СПГ на входе в испаритель определялись по показанию манометра, установленного на криогенных топливных баках (резервуарах для хранения СПГ). Расчет выполнялся при заданном числе оборотов ДВС CUMMINS KTA 50 –

1200 об/мин.

Температура СПГ на входе в испаритель была неизвестна, для ее определения использовалась $i - T$ зависимость – диаграмма по экспериментальным данным Н.В. Павловича [18].

Расход СПГ на входе в испаритель, являющийся неотъемлемой частью КБТС, определялся из уравнения теплового баланса, если полагать, что теплота, переданная от тосола, расходуется на фазовый переход СПГ в состояние сухого насыщенного пара смеси и ее перегрев при постоянном давлении. На

Таблица 3. Результаты измерений расходных характеристик ДВС CUMMINS KTA 50 в производственных условиях

Table 3. The results of field measurements of consumption characteristics of CUMMINS KTA 50 internal combustion engine

№ п/п	Условия работы	Обороты ДВС, об/мин	Расход тосола, л/мин	Расход тосола, м³/с	Температура тосола на входе в испаритель, t₁, °C	Температура тосола на выходе из испарителя, t₂, °C	Температура парообразного (перегретого) газа после испарителя на выходе редуктора, °C	Скорость воздуха средняя в левом трубопроводе ω₁, м/с	Скорость воздуха средняя в правом трубопроводе ω₂, м/с
1.	порожний	1200	79,3	0,0013217	93,74	92,69	45	6,70	5,39
2.	порожний	1300	86	0,0014333	95,57	92,80	45	7,09	6,40
3.	груженный	1500	103	0,0017167	90,75	89,14	45	10,67	11,12
4.	груженный	1700	114	0,0019	93,87	93,34	40	13,46	14,22
5.	груженный	1940	131	0,0021833	93,10	82,39	40	25,26	26,76

Таблица 4. Результаты измерений расходных характеристик ДВС CUMMINS KTA 50 в производственных условиях

Table 4. The results of field measurements of consumption characteristics of CUMMINS KTA 50 internal combustion engine

№ п/п	Условия работы	Число оборотов двигателя, об/мин.	Расход тосола, л/мин.	Температура тосола на входе в испаритель, °C	Температура тосола на выходе из испарителя, °C	Расход газообразного природного газа, м³/ч	Скорость газа в трубопроводе после форсунок, м/с
1.	холостой ход	650	47,3	85,06	84,01	-	-
2.	холостой ход	1000	74,6	87,71	78,42	-	-
3.	порожний на спуске	1300	86,2	94,13	92,26	19,69	41,23
4.	порожний на спуске	1300	86,4	95,70	85,86	19,92	41,71
5.	груженный на спуске	1300	87,26	95,17	81,50	19,08	39,94
6.	порожний на спуске	1300	89	95,30	92,04	21,53	45,08
7.	порожний на спуске	1300	96,3	91,48	86,81	15,24	31,91
8.	порожний на подъеме	1500	103,2	96,10	84,52	26,82	56,16
9.	груженный на подъеме	1500	104	95,57	89,24	33,80	70,78
10.	порожний на подъеме	1700	115	95,96	84,62	31,35	65,64
11.	груженный на подъеме	1700	116	95,96	93,23	32,73	68,53
12.	груженный на подъеме	1800	120	95,17	88,50	34,11	71,42
13.	груженный на подъеме	1800	125	94,00	89,89	31,73	66,44
14.	груженный на подъеме	1940	133	94,38	88,39	34,26	71,74
15.	груженный на подъеме	1940	133,1	94,78	88,82	35,57	74,47
16.	груженный на подъеме	1940	134	95,04	87,12	35,49	74,31

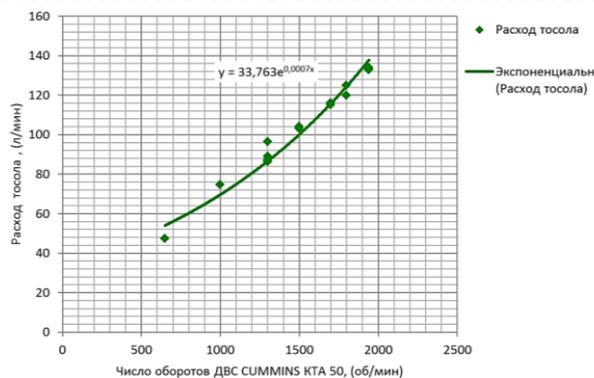


Рис. 7. Расход тосола в зависимости от числа оборотов ДВС CUMMINS KTA 50 и условий работы

Fig. 7. Antifreeze consumption depending on the speed of CUMMINS KTA 50 internal combustion engine and operating conditions

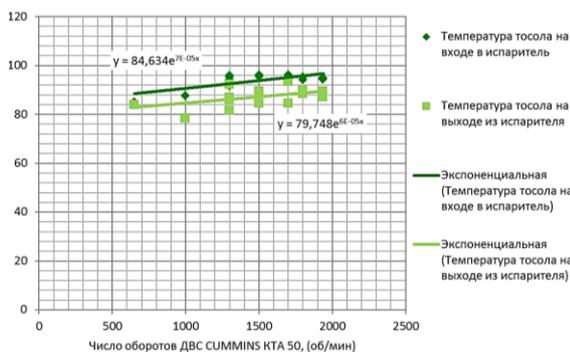


Рис. 8. Температура тосола на входе и выходе из испарителя в зависимости от числа оборотов ДВС и условий работы

Fig. 8. Antifreeze temperature at the inlet and outlet of the evaporator depending on the speed of CUMMINS KTA 50 internal combustion engine and operating conditions

В расчете принималось, что давление СПГ на входе в испаритель и давление газа на выходе из него одинаково, т.е.:

$$P_1 = P_2; \quad (2)$$

Теплота Q_1 , отданная сжиженному природному газу может расходоваться:

– в случае недогрева до состояния насыщения, на нагрев сжиженного газа до температуры кипения при соответствующем давлении:

$$Q_2 = Gc_i(\theta_2 - \theta_1); \quad (3)$$

– на фазовый переход газа из жидкого состояния в парообразное (газообразное) Q_3 при температуре θ_2 :

$$Q_3 = G(i'' - i'); \quad (4)$$

– на перегрев газа до температуры θ_3 , равной температуре на выходе из испарителя Q_4 :

$$Q_4 = Gc_{pg}(\theta_3 - \theta_2); \quad (5)$$

Так как достоверные данные по температуре θ_3 отсутствовали, то было сделано предположение, что СПГ подается в испаритель при температуре кипения θ_2 , поэтому Q_2 в расчетах не учитывалось. Энтальпия газа при температуре перегрева и жидкости в состоянии насыщения определялась по $i - T$ диаграмме Н.В. Павловича.

Из теплового баланса $Q_1 = Q_3 + Q_4 + Q_{pot}$ определялся массовый расход газа G с учетом того, что потери теплоты в окружающую среду составляют 3-5% от Q_1 , по следующей зависимости:

$$\begin{aligned} G &= \frac{0,95 \cdot Q_1}{(i'' - i') + c_{pg}(\theta_3 - \theta_2)} \\ &= \frac{0,95 \cdot 5,527}{(-80 - (-176)) \cdot 4,19 + 2,23 \cdot (45 - (-115))} \\ &= 0,0069 \frac{\text{кг}}{\text{с}} \end{aligned}$$

Диапазон частоты оборотов ДВС CUMMINS KTA 50 при проведении исследований составлял от 1200 до 1940 оборотов в минуту при различных условиях работы (порожний и груженный). Ключевые измеренные расходные значения представлены в табл. 3.

На следующем этапе в производственных условиях были проведены дополнительные исследования расходных характеристик ДВС CUMMINS KTA 50 с одновременной фиксацией следующих параметров: число оборотов ДВС, расход тосола, температура тосола на входе и выходе из испарителя, расход и скорость течения газообразного природного газа в трубопроводе после форсунок. Данные значения представлены в табл. 4 и на рис. 7-8.

Представленные в табл. 4 значения расхода газообразного природного газа получены при установке в КБТС одного расходомера. После расходомера устанавливался тройник, пройдя по которому, газообразный природный газ подавался на два ряда цилиндров ДВС CUMMINS KTA 50. Внутренний диаметр установленного расходомера при этом составлял 13,1 мм. В процессе исследований было установлено, что замещение дизельного топлива природным газом ограничивалось проходным сечением расходомера. По этой причине впоследствии было установлено два расходомера на каждый ряд цилиндров с внутренним диаметром трубопровода 16 мм (см. рис. 1). В результате этого были получены иные значения расхода газообразного природного газа, представленные далее в табл. 5.

Как можно увидеть из данных, представленных в табл. 4 и на рис. 7-8, среднее значение показаний разности температур на входе и выходе тосола составляет 6,6°C. Данный факт подтверждает эффективность разработанной конструкции испарителя, у которого в качестве теплоносителя используется охлаждающая жидкость карьерного самосвала – тосол. Расход тосола при увеличении числа оборотов двигателя увеличивается от 47 до 133 л/мин. В режиме

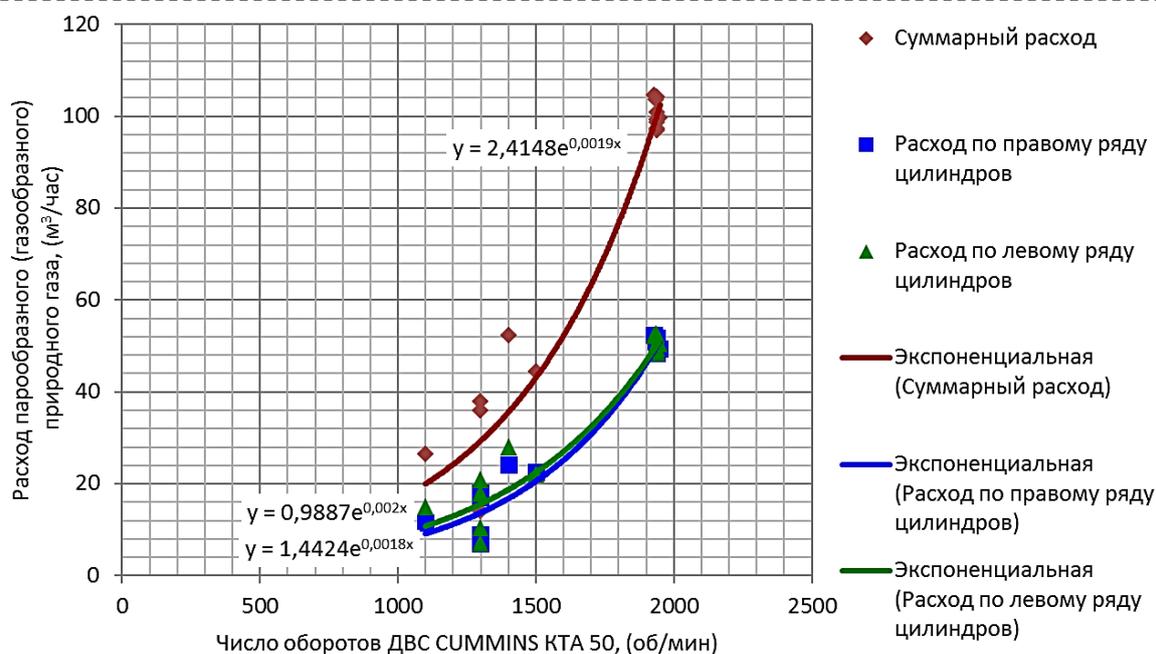


Рис. 9. Расход газообразного природного газа в зависимости от числа оборотов ДВС CUMMINS KTA 50 и условий эксплуатации
 Fig. 9. Consumption of gaseous natural gas depending on the speed of CUMMINS KTA 50 internal combustion engine and operating conditions

Таблица 5. Результаты измерений расхода газообразного природного газа в зависимости от числа оборотов ДВС CUMMINS KTA 50 при различных условиях эксплуатации
 Table 5. The results of measurements of the consumption of gaseous natural gas depending on the speed of the CUMMINS KTA 50 internal combustion engine under various operating conditions

№ п/п	Условия работы	Число оборотов ДВС, об/мин	Расход парообразного (газообразного) природного газа по правому ряду цилиндров, м³/ч	Расход парообразного (газообразного) природного газа по левому ряду цилиндров, м³/ч	Суммарный расход парообразного (газообразного) природного газа по правому и левому ряду цилиндров, м³/ч
1.	порожний на спуске	1100	11,3	15,0	26,3
2.	груженный на спуске	1300	6,98	7,15	14,13
3.	порожний на спуске	1300	8,75	10,3	19,05
4.	порожний на спуске	1300	17,95	18,06	36,01
5.	порожний на спуске	1300	17,06	20,9	37,96
6.	порожний по прямой	1400	24,16	28,0	52,16
7.	порожний по прямой	1500	22,29	22,09	44,38
8.	груженный на подъеме	1930	52,23	52,2	104,43
9.	груженный на подъеме	1935	50,96	52,69	103,65
10.	груженный на подъеме	1937	48,78	50,38	99,16
11.	груженный на подъеме	1938	48,27	48,64	96,91
12.	груженный на подъеме	1940	48,73	48,4	97,13
13.	груженный на подъеме	1940	49,22	49,34	98,56
14.	груженный на подъеме	1940	50,27	50,6	100,87
15.	груженный на подъеме	1940	51,67	52,3	103,97
16.	порожний на подъеме	1950	49,17	50,49	99,66

эксплуатации на холостом ходу ДВС CUMMINS KTA 50 работает только на дизельном топливе, поэтому потребление природного газа отсутствует. В режиме эксплуатации на холостом ходу ДВС CUM-

MINS KTA 50 работает только на дизельном топливе, поэтому потребление природного газа отсутствует.

С усложнением условий работы при подъеме груженного карьерного самосвала БелАЗ 75131 в

гору сопровождающегося увеличением числа оборотов ДВС CUMMINS KTA 50, пропорционально возрастает скорость движения по трубопроводам газообразного природного газа после форсунок и соответственно его расход. Это в свою очередь свидетельствует о том, что карьерные самосвалы, оснащенные КБТС, наиболее эффективны с экономической точки зрения при эксплуатации на сложных участках горных выработок, имеющих большие уклоны, где происходит максимальная нагрузка на ДВС и соответственно идет максимальный расход природного газа, замещающего дизельное топливо. Кроме этого, важным моментом является и экологическая сторона данного вопроса. Как известно, максимальное потребление дизельного топлива происходит на сложных участках горных выработок при подъеме карьерного самосвала в гору, где в том

числе происходит и максимальный выброс с выхлопными газами вредных веществ, что приводит к загазованности и задымленности промплощадок, особенно в зимний период времени.

Представленные на рис. 9 и в табл. 5 данные свидетельствуют о том, что с усложнением условий работы, сопровождающееся увеличением числа оборотов ДВС CUMMINS KTA 50, пропорционально возрастает расход природного газа по каждому ряду цилиндров. Причем необходимо отметить, что среднее значение разницы показаний расхода газообразного природного газа между рядами цилиндров не превышало $1,2 \text{ м}^3/\text{ч}$. Это, очевидно, объясняется техническим состоянием ДВС CUMMINS KTA 50, в том числе состоянием ее поршневой системы, а также некоторыми погрешностями измерений. Данные табл. 5 и рис. 9 также говорят о том, что при увеличении оборотов двигателя разница показаний

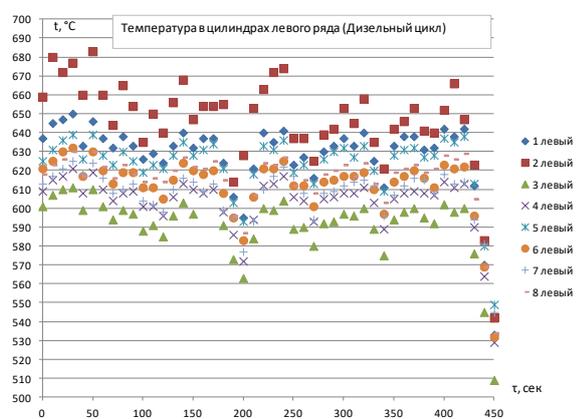


Рис. 10. Температура в цилиндрах левого ряда при дизельном цикле работы карьерного самосвала БелАЗ-75131 (сентябрь $t_{\text{окр.ср.}} +18^\circ\text{C}$)
Fig. 10. Temperature in the left bank cylinders under diesel-fuelled operation of BelAZ-75131 mining dump truck (September $t_{\text{amb}} +18^\circ\text{C}$)

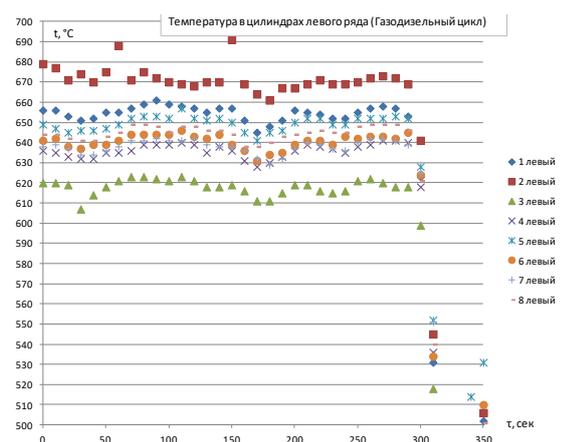


Рис. 11. Температура в цилиндрах левого ряда при газодизельном цикле работы карьерного самосвала БелАЗ-75131 (сентябрь $t_{\text{окр.ср.}} +18^\circ\text{C}$)
Fig. 11. Temperature in the left bank cylinders under gas-diesel-fuelled operation of BelAZ-75131 mining dump truck (September $t_{\text{amb}} +18^\circ\text{C}$)



Рис. 12. Температура в цилиндрах правого ряда при дизельном цикле работы карьерного самосвала БелАЗ-75131 (сентябрь $t_{\text{окр.ср.}} +18^\circ\text{C}$)
Fig. 12. Temperature in the right bank cylinders under diesel-fuelled operation of BelAZ-75131 mining dump truck (September $t_{\text{amb}} +18^\circ\text{C}$)

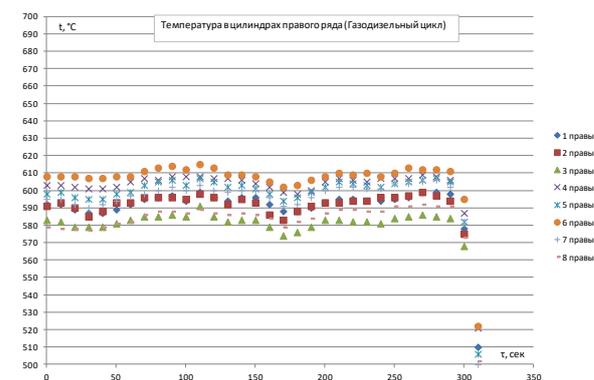


Рис. 13. Температура в цилиндрах правого ряда при газодизельном цикле работы карьерного самосвала БелАЗ-75131 (сентябрь $t_{\text{окр.ср.}} +18^\circ\text{C}$)
Fig. 13. Temperature in the right bank cylinders under gas-diesel-fuelled operation of BelAZ-75131 mining dump truck (September $t_{\text{amb}} +18^\circ\text{C}$)

расхода газообразного природного газа между рядами цилиндров значительно снижается.

Важной частью представленных исследований являлось проведение измерений и сравнение профилей температур в цилиндрах при работе ДВС CUMMINS KTA 50 на дизельном и газодизельном топливах. Измерения выполнялись на технологической трассе угольного разреза по одному и тому же маршруту в сентябре при температуре окружающей среды +18°C. При измерениях движение газодизельного карьерного самосвала БелАЗ 75131 осуществлялось на максимальных оборотах двигателя $n=1940-1950$ об/мин. Расход тосола изменялся в диапазоне 129,9-133 л/мин. Показания расходомеров по потреблению газообразного природного газа по правому и левому ряду цилиндров составил в 62 и 59 м³/ч соответственно. Средняя температура газа после испарителя на выходе из редуктора составляла +35°C. Давление газа после редуктора – 4,89 ата. Двигатель работал устойчиво. Перепад давлений между турбинами был в норме. Фиксированные значения температур выходящих из цилиндров газов, отражающих температуру в цилиндрах при работе на дизельном и газодизельном топливе, представлены на рис. 10-13.

Как показали результаты проведенных исследований, работа ДВС CUMMINS KTA 50 на дизельном и газодизельном топливах отличается по температуре и ее стабильности в цилиндрах. Так работа двигателя в дизельном режиме сопровождается некоторым разбросом значений температур, как по левому, так и по правому ряду цилиндров. При работе же на газодизельном топливе такого разброса не наблюдается, что подтверждается уменьшением амплитуд разброса точек на графике. Это говорит о том, что использование природного газа в качестве моторного топлива приводит к более стабильному температурному режиму работы ДВС. Однако, при работе по газодизельному циклу наблюдается небольшое повышение температуры в среднем на 10-15°C. Данное, незначительное повышение температуры не может критически сказаться на работе ДВС CUMMINS KTA 50.

Заключение

Результаты проведенных исследований расходных и температурных характеристик ДВС CUMMINS KTA 50 карьерных самосвалов БелАЗ 75131, работающих по газодизельному циклу, позволили сформулировать следующие выводы:

1. Разработанная методика проведения исследований расходных и температурных характеристик, а также принципиальная схема измерения расхода парообразного (газообразного) природного газа, включая специально спроектированный для этих целей демпфер гаситель пульсаций газа, позволили качественно и количественно в производственных условиях на участках горных выработок провести необходимые исследования.

2. Исследование связи между соотношениями замещения дизельного топлива природным газом и энергетическим зарядом этих замещений показало,

что экономически целесообразным соотношением замены дизельного топлива газообразным топливом необходимо считать значение не более 1,0, т.е. для замещения 1 л. дизельного топлива необходимо и достаточно 1 м³ природного газа.

3. В производственных условиях при увеличении числа оборотов ДВС CUMMINS KTA 50 от 650 до 1940 об/мин пропорционально увеличивается от 47 до 134 л/мин расход тосола, проходящего через испаритель криогенной бортовой топливной системы.

4. Среднее значение показаний разности температур на входе и выходе тосола из испарителя составило 6,6°C, что подтверждает эффективность схемного и конструктивного решения разработанной и реализуемой системы испарения (испарителя) криогенной бортовой топливной системы.

5. Расход газообразного природного газа не зависит от загрузки (груженный, порожний) газодизельного карьерного самосвала БелАЗ 75131. Расход газообразного природного газа зависит от числа оборотов ДВС, режима его движения (по прямой, на подъеме, на спуске) и специфики вождения.

6. Эксплуатация в газодизельном режиме карьерных самосвалов БелАЗ-75131 по отношению к дизельному режиму сопровождается более устойчивыми и постоянными температурами по каждому ряду цилиндров при относительно небольшом общем ее увеличении, в среднем на 10-15°C, что не отражается критически на работе ДВС CUMMINS KTA 50.

7. С эколого-экономической точки зрения газодизельные карьерные самосвалы БелАЗ-75131 наиболее эффективны в эксплуатации на сложных участках горных выработок, имеющих большие уклоны, где происходит максимальная нагрузка на ДВС и соответственно идет максимальный расход природного газа, замещающего дизельное топливо.

8. Результаты проведенных исследований расходных и температурных характеристик ДВС CUMMINS KTA 50 карьерных самосвалов БелАЗ-75131, работающих по газодизельному циклу, показали перспективность и конкурентоспособность данного вида карьерной техники по отношению к дизельному транспорту при эксплуатации в тяжелых условиях промплощадок горнодобывающих предприятий.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Гайнуллин, Ф. Г. Природный газ как моторное топливо на транспорте / Ф.Г. Гайнуллин, А.И. Гриценко, Ю.Н. Васильев, Л.С. Золотаревский. – М.: Недра, 1986. – 255 с.
2. 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.

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. 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, pp.785-795. DOI: org/10.1016/j.rser.2016.12.104

5. 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

6. 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. – Vol. 53. – P. 52-57. DOI: 10.1016/j.energy.2013.02.027

7. Wahhab H.A.A., M.A. Ismael, A. Aziz, Heikal M.R. Research article modeling of a spray of diesel fuel with dissolved liquefied natural gas // Asian Journal of Applied Sciences. – 2017. – № 10 (2). – P. 88-95. DOI: 10.3923/ajaps.2017.88.95.

8. 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.

9. 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.

10. 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.

11. 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.

12. Кузнецов И.В., Паначев И.А., Дубов Г.М., Нохрин С.А. 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.

13. 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.

14. 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.

15. 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.

16. Патент № 2701133, Российская Федерация, МПК B60K 15/07, F17C 13/08 (2006.01). Способ установки криогенных топливных баков на карьерном самосвале: № 2019103118; заявл. 04.02.19; опублик. 24.09.19, Бюл. №27 / Нохрин С.А., Дубов Г.М., Трухманов Д.С.; заявитель ООО "Сибирь-Энерго". – 14 с.: ил.

17. 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.

18. Павлович Н.В. Справочник по теплофизическим свойствам природных газов и их компонентов - Москва; Ленинград: Госэнергоиздат, 1962. – 119 с.

Georgiy M. Dubov¹, C. Sc. in Engineering, Associate Professor, **Aleksandr R. Bogomolov**^{1,2,*}, Dr. Sc. in Engineering, Associate Professor, **Sergey S. Azikhanov**^{1,2}, C. Sc. in Engineering, Associate Professor, **Elena A. Grigorieva**¹, in Engineering, Senior Lecturer, **Sergey A. Nokhrin**³ in Engineering, Deputy General Director for Gasification of Motor Transport

¹T.F. Gorbachev Kuzbass State Technical University, 28, Vesennyaya 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

STUDY OF FUEL CONSUMPTION AND TEMPERATURE CHARACTERISTICS OF GAS-DIESEL BELAZ 75131 DUMP TRUCKS

Abstract: The issue of a comparative study of fuel consumption and temperature characteristics of gas-diesel BelAZ 75131 mining dump trucks equipped with an on-board cryogenic fuel system and hauling rock mass at the Kuzbass open-pit coal mine is considered in the article. A brief analysis of the efficiency of using liquefied natural gas (LNG) - methane - as a motor fuel for mining dump trucks is carried out. It is noted that the use of LNG fuel for heavy-duty dump trucks is one of the most promising ways to improve the environmental and economic indicators during the operation of this type of mining equipment. The technique and instrumental base for conducting research are presented. The relationship between the natural ratios of diesel fuel replacement with natural gas and the energy charge of these replacement is studied. The following data are presented: data on the consumption of vaporous (gaseous superheated) natural gas (hereinafter gaseous natural gas) during field operation of gas-diesel BelAZ 75131 mining dump trucks; consumption of gaseous natural gas in pipelines; consumption of antifreeze at the inlet to the evaporator of liquefied natural gas, as well as antifreeze temperature at the inlet and outlet of the evaporator; temperature of gaseous natural gas at the outlet of the reducer after the evaporator; data on the comparison of temperature profiles in the cylinders of CUMMINS KTA 50 internal combustion engine under diesel and gas-diesel operation.

Keywords: BelAZ, mining dump truck, liquefied natural gas, gas-diesel operation, on-board cryogenic fuel system, evaporator.

Article info: received May 31, 2021

DOI: 10.26730/1816-4528-2021-3-20-31

REFERENCES

1. Gainullin, F.G. Natural gas as a vehicle fuel in transport / F.G. Gainullin, A.I. Gritsenko, Yu.N. Vasiliev, L.S. Zolotarevsky. – Moscow: Nedra, 1986. – 255 p.
2. 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 MULTI-CONFERENCE 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.
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. 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, pp.785-795. DOI: org/10.1016/j.rser.2016.12.104.
5. 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.
6. 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.
7. Wahhab H.A.A., M.A. Ismael, A. Aziz, Heikal M.R. Research article modeling of a spray of diesel fuel with dissolved liquefied natural gas // Asian Journal of Applied Sciences. – 2017. – № 10 (2). – P. 88–95. DOI: 10.3923/ajaps.2017.88.95.
8. 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.
9. 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.
10. Chernetsov D.A. Diesel exhaust gas toxicity and their anthropogenic impact // Issues of modern science and practice. N. Vernadsky University. 2010. №10-12(31). C. 54-59.
11. 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.

12. 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.

13. 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.

14. 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.

15. 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.

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

17. 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.

18. Pavlovich, N.V. Handbook on the thermo-physical properties of natural gases and their components. - Moscow; Leningrad: Госэнергоиздат, 1962. – 119 p.

Библиографическое описание статьи

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.

Reference to article

Dubov G.M., Bogomolov A.R., Azikhanov S.S., Grigorieva E.A., Nokhrin S.A. Study of fuel consumption and temperature characteristics of gas-diesel BelAZ 75131 dump trucks. Mining Equipment and Electromechanics, 2021, no.3 (155), pp. 20-31.