

Трухманов Дмитрий Сергеевич¹, старший преподаватель, **Дубов Георгий Михайлович**^{1*}, кандидат технических наук, доцент, **Чегошев Алексей Александрович**¹, старший преподаватель, **Ельцов Иван Евгеньевич**¹, магистрант, **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

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

*E-mail: nikokem@mail.ru

МЕТОДОЛОГИЯ ОЦЕНКИ ТЕХНИКО-ЭКОНОМИЧЕСКИХ ПОКАЗАТЕЛЕЙ КРИОГЕННЫХ БОРТОВЫХ ТОПЛИВНЫХ СИСТЕМ КАРЬЕРНЫХ САМОСВАЛОВ БЕЛАЗ, ПОТРЕБЛЯЮЩИХ В КАЧЕСТВЕ МОТОРНОГО ТОПЛИВА СПГ

Аннотация: Рассматривается состояние вопроса о преимуществах использования сжиженного природного газа (СПГ) в качестве моторного топлива на карьерных самосвалах взамен дизельного топлива (ДТ). Отмечается, что энергоёмкость процесса транспортирования горной массы карьерными самосвалами БелАЗ, работающими в двухтопливном (газодизельном) режиме, меньше, чем для карьерных самосвалов БелАЗ, работающих только на дизельном топливе. Утверждается, что наиболее перспективным направлением с точки зрения эколого-экономических показателей применительно к тяжёлой карьерной технике представляется перевод дизельных двигателей карьерных самосвалов на газодизельный режим работы. Представлена комплексная универсальная методика по оценке технико-экономических показателей криогенных бортовых топливных систем (КБТС), используемых в настоящее время на карьерных самосвалах. Подробно описан способ оценки параметра «коэффициент замещения» ДТ СПГ при эксплуатации карьерных самосвалов БелАЗ-75131 оснащённых КБТС. Представлена возможная последовательность циклового, односменного и суточного мониторинга параметра «коэффициент замещения» ДТ СПГ. Приведен способ оценки экономической эффективности эксплуатации модернизированных для работы по газодизельному циклу тяжёлых карьерных самосвалов БелАЗ, который позволяет в том числе определить фактический срок службы КБТС, установленных на карьерных самосвалах БелАЗ, и их наработку на отказ.

Ключевые слова: карьерный самосвал БелАЗ, сжиженный природный газ, криогенная бортовая топливная система, двухтопливный (газодизельный) режим работы.

Информация о статье: принята 31 мая 2021 г.

DOI: 10.26730/1816-4528-2021-3-32-38

Введение

В мире ежегодно возрастает потребление минеральных ресурсов. Это в ближайшем будущем приведет к значительной потребности у горнодобывающих компаний в горно-технологическом оборудовании высокого качества, обеспечивающем постоянно возрастающие эколого-экономические требования при его эксплуатации [1].

В настоящее время правительством России уделяется особое внимание реализации проектов в области производства СПГ (Президент РФ: поручения Пр-2699 от 25.12.2017 г.) и расширения использования СПГ в качестве моторного топлива (Президент РФ: поручения Пр-743 от 18.04.2018 г.).

Наибольший эколого-экономический эффект, от использования СПГ взамен нефтяного (дизельного) моторного топлива, можно получить на крупных транспортных средствах - тяжёлых карьерных само-

свалах, непрерывно работающих в течение длительного времени на сложных участках горных выработок. При использовании СПГ в качестве моторного топлива значительно снижается газозаванность промышленных площадок горнодобывающих предприятий, разрабатывающих месторождения полезных ископаемых открытым способом. В составе выхлопных газов снижается содержание углекислого газа (диоксида углерода) CO₂, являющегося парниковым газом и отрицательно влияющего на глобальное потепление Земли. Использование СПГ также позволяет: снизить содержание сажи, токсичных и канцерогенных веществ в выхлопных газах; увеличить ресурс работы двигателя; уменьшить шум от работы двигателя; стабилизировать температурный режим в цилиндрах двигателя; значительно снизить затраты на топливо [2-7]. Проведенные ранее исследования также говорят о том,

что энергоемкость процесса транспортирования горной массы карьерными самосвалами, работающими в двухтопливном (газодизельном) режиме, при частичном замещении ДТ СПГ меньше, чем для карьерных самосвалов, работающих только на ДТ [8,9].

СПГ представляет наиболее перспективную альтернативу нефтяным видам моторного топлива, что подтверждается рядом исследований в этой области. В настоящее время для использования СПГ в качестве моторного топлива на тяжелых карьерных самосвалах применяются два способа: используют двигатели внутреннего сгорания, потребляющие в качестве моторного топлива только газ, а также оснащают существующие дизельные двигатели КБТС, позволяющими осуществлять частичное замещение ДТ СПГ – метан [10-17]. На сегодняшний день наиболее перспективным применительно к тяжелой карьерной технике представляется перевод дизельных двигателей на газодизельный режим работы (оснащение их КБТС) при частичном замещении ДТ СПГ [8,18]. Это обусловлено рядом факторов, таких, как:

- существующий сегодня мировой парк тяжелой карьерной техники оснащен в основном дизельными двигателями большой мощности и в ближайшей перспективе установка на них двигателей, работающих только на газу, представляется экономически нецелесообразным [19];

- перевод горнотранспортного оборудования на газодизельный режим работы не требует существенной конструктивной переделки самого дизельного двигателя, что обеспечивает минимальные затраты на его модернизацию [20];

- оснащение карьерных самосвалов КБТС позволяет эксплуатировать карьерную технику как на ДТ, так и на газодизельной смеси (в двухтопливном-газодизельном режиме), что достаточно актуально для Сибири и крайнего Севера с суровыми климатическими условиями [21];

- сроки окупаемости затрат на модернизацию карьерной техники для ее работы в газодизельном режиме, невелики, что гарантирует наличие экономического эффекта.

Целью представленной работы является разработка комплексной методики по оценке технико-экономических показателей КБТС, используемых на карьерных самосвалах БелАЗ-75131, потребляющих в качестве моторного топлива СПГ – метан.

Результаты и обсуждение

Для оценки технико-экономических показателей КБТС, установленных на карьерных самосвалах БелАЗ-75131 и эксплуатирующихся с 2017 года на разрезах Кузбасса, была разработана комплексная методика. Данная методика позволяет оценивать параметр «коэффициент замещения» (K_z) ДТ СПГ – метана при эксплуатации карьерных самосвалов в газодизельном режиме, а также провести оценку экономической эффективности эксплуатации карьерных самосвалов, оснащенных КБТС.

Рассмотрим подробно данную методику.

Для комплексной оценки технико-экономических показателей КБТС необходимо максимально учитывать горно-технические и горно-технологические условия эксплуатации самосвалов, а также фактическое техническое состояние их узлов и систем. На первоначальном этапе определяется экспериментальный модернизированный карьерный самосвал (ЭМКС), оснащенный КБТС и имеющий, соответственно, возможность работать в двухтопливном/газодизельном режиме. Состояние двигателя и топливных систем ЭМКС должно быть исправно. Перед проведением мониторинга водитель ЭМКС должен получить соответствующие инструкции (по скорости движения, режимов переключения с дизельного на газодизельный режим работы и т.д.), которые он обязан соблюдать.

На период мониторинга и сбора информации ЭМКС должен эксплуатироваться в максимально идентичных условиях, а именно: ЭМКС должен загружаться одним и тем же экскаватором на одном маршруте минимум в течение одной смены; необходимо соблюдать единый скоростной режим и плавность хода, установленные нормами или требованиями организации эксплуатанта ЭМКС.

Требования, предъявляемые к техническому состоянию ЭМКС и системам мониторинга, должны быть следующими: ЭМКС должен быть укомплектован системами мониторинга параметров его эксплуатации, в том числе системами топливных расходов (как дизельного, так и газообразного топлива) с возможностью учета расхода в единицу времени; системы мониторинга должны фиксировать время каждого этапа цикла эксплуатации ЭМКС, расстояние ходки, вес перевозимой горной массы, скорость движения, расход топлива, номер/модель экскаватора; необходимо фиксировать погодные условия для более полной оценки эффективности эксплуатации КБТС.

Водитель ЭМКС должен циклично чередовать режимы транспортирования (дизельный и газодизельный), соблюдая при этом скоростной режим и плавность хода. Проведение мониторинга может осуществляться за цикл, одну рабочую смену (дневную и ночную), одни сутки.

Цикловой мониторинг.

1 этап:

Водитель ЭМКС должен сделать две ходки подряд на ДТ. После каждой ходки на ДТ снимаются показания с расходомера ДТ и фиксируются полученные значения. По показаниям расходомера определяется суммарный расход ДТ при двух ходках:

$$P_{\text{сум. д.т.}} = P_{1\text{ход. д.т.}} + P_{2\text{ход. д.т.}} \quad (1)$$

где, $P_{\text{сум. д.т.}}$ – суммарный расход ДТ при двух ходках, (л); $P_{1\text{ход. д.т.}}$ – расход ДТ за первую ходку, л; $P_{2\text{ход. д.т.}}$ – расход ДТ за вторую ходку, (л).

2 этап:

После двух ходок на ДТ водитель ЭМКС делает две ходки на газодизельном (смешанном) топливе. После каждой ходки на газодизельном (смешанном) топливе снимаются показания с расходомера ДТ и

фиксируются полученные значения. По полученным значениям определяется суммарный расход ДТ при двух ходках на газодизельном (смешанном) топливе:

$$P_{\text{сум. г.д.т.}} = P_{1\text{ход. г.д.т.}} + P_{2\text{ход. г.д.т.}} \quad (2)$$

где, $P_{\text{сум.г.д.т.}}$ – суммарный расход ДТ при двух ходках на газодизельном (смешанном) топливе, (л); $P_{1\text{ход. г.д.т.}}$ – расход ДТ за первую ходку, (л); $P_{2\text{ход. г.д.т.}}$ – расход ДТ за вторую ходку, (л).

3 этап:

Используя значения, полученные в формулах 1 и 2, определяется коэффициент замещения ДТ СПГ – метан при цикловом мониторинге $K_{з.ц.}$:

$$K_{з.ц.} = 1 - \frac{P_{\text{сум. г.д.т.}}}{P_{\text{сум. д.т.}}} \quad (3)$$

где, $K_{з.ц.}$ – коэффициент замещения ДТ СПГ – метан при цикловом мониторинге; $P_{\text{сум.г.д.т.}}$ – суммарный расход ДТ при двух ходках на газодизельном (смешанном) топливе, (л); $P_{\text{сум.д.т.}}$ – суммарный расход ДТ при двух ходках на дизельном топливе, (л).

Если необходимо определить коэффициент замещения в процентном отношении, то формула 3 будет иметь следующий вид:

$$K_{з.ц.} = (1 - \frac{P_{\text{сум. г.д.т.}}}{P_{\text{сум. д.т.}}}) \times 100\% \quad (4)$$

Односменный мониторинг.

В течение одной рабочей смены должны пропорционально чередоваться две ходки на ЭМКС на ДТ и две ходки на газодизельном (смешанном) топливе. Ходок на ДТ должен быть две подряд (одна за другой), и ходок на газодизельном (смешанном) топливе также должно быть две подряд (одна за другой). Для достоверности и сопоставимости сравнительной оценки полученных данных необходимо в течение одной смены осуществить равное и четное количество ходок как на ДТ, так и на газодизельном (смешанном) топливе.

1 этап:

На первом этапе определяется суммарное значение расхода ДТ в одну смену $P_{\text{сум. д.т. ом}}$ при всех ходках ЭМКС только на ДТ посредством суммирования всех полученных и зафиксированных значений расхода ДТ:

$$P_{\text{сум. д.т. ом.}} = P_{1\text{ход. д.т.}} + P_{2\text{ход. д.т.}} + \dots \quad (5)$$

где, $P_{1\text{ход. д.т.}}$ – расход ДТ за первую ходку, (л); $P_{2\text{ход. д.т.}}$ – расход ДТ за вторую ходку, (л); $P_{n+1\text{ход. д.т.}}$ – расход ДТ за все последующие пары ходок в течение одной рабочей смены, л.

2 этап:

На втором этапе определяется суммарное значение расхода ДТ в одну смену $P_{\text{сум. г.д.т. ом}}$, при всех ходках ЭМКС только на газодизельном (смешанном) топливе, посредством суммирования всех полученных и зафиксированных значений расхода ДТ:

$$P_{\text{сум. г.д.т. ом.}} = P_{3\text{ход. г.д.т.}} + P_{4\text{ход. г.д.т.}} + \dots \quad (6)$$

где, $P_{3\text{ход. г.д.т.}}$ – расход ДТ за третью ходку, (л); $P_{4\text{ход. г.д.т.}}$ – расход ДТ за четвертую ходку, (л); $P_{n+1\text{ход. г.д.т.}}$ – расход ДТ за все последующие пары ходок в течение одной рабочей смены, (л).

3 этап:

Используя значения, полученные в формулах 5 и 6 определяется коэффициент замещения $K_{з.о.}$ ДТ СПГ – метан при мониторинге за одну рабочую смену:

$$K_{з.о.} = 1 - \frac{P_{\text{сум. г.д.т. ом.}}}{P_{\text{сум. д.т. ом.}}} \quad (7)$$

Если необходимо определить коэффициент замещения в процентном отношении, то формула (9) будет иметь следующий вид:

$$K_{з.о.} = (1 - \frac{P_{\text{сум. г.д.т. ом.}}}{P_{\text{сум. д.т. ом.}}}) \times 100\% \quad (8)$$

Суточный мониторинг.

Проведение суточного мониторинга должно осуществляться на одном и том же ЭМКС последовательно и в одни сутки. После проведения мониторинга в дневную смену, сразу проводится мониторинг в ночную смену.

В разное время суток и в разные периоды времени года (особенно в зимний период времени) ощутимо проявляются воздействия внешних факторов, которые сказываются на оценке коэффициента замещения $K_{з.}$,

а именно: изменение температуры окружающей среды в дневное и ночное время и в разные периоды времени года; стиль управления водителя карьерного самосвала в различное время суток и т.д. В этой связи значения показателя $K_{з.}$ ДТ СПГ – метан могут различаться в зависимости от времени суток и времени года при эксплуатации ЭМКС.

При определении коэффициента замещения $K_{з.}$ ДТ СПГ – метан за одни сутки, необходимо провести односменные мониторинги как в дневную, так и в ночную смену. Используя значение $K_{з.}$ ДТ СПГ – метан, полученные по формуле 7 при мониторинге за одну дневную рабочую смену и за одну ночную рабочую смену, определяется среднее значение за одни сутки $K_{з. \text{сут.}}$ ДТ СПГ – метан:

$$K_{з. \text{сут.}} = \frac{K_{з.о.(д.с.)} + K_{з.о.(н.с.)}}{2} \quad (9)$$

где, $K_{з.сут.}$ – коэффициент замещения за сутки; $K_{з.о.(д.с.)}$ – коэффициент замещения за дневную смену; $K_{з.о.(н.с.)}$ – коэффициент замещения за ночную смену;

Если необходимо определить коэффициент замещения в процентном отношении, то формула 13 будет иметь следующий вид:

$$K_{з. \text{сут.}} = (\frac{K_{з.о.(д.с.)} + K_{з.о.(н.с.)}}{2}) \times 100\% \quad (10)$$

При наличии в КБТС измерительного комплекса расхода парообразного (газообразного) природного газа после каждой дневной и ночной смены по полученным значениям расхода газа в дневную смену $P_{\text{Гсум.}}$ г.д.т. (д.с.)

и в ночную смену $P_{Г\text{сум. г.д.т. (н.с.)}$ определяется суммарный расход газа в одни сутки $P_{Г\text{сум. г.д.т. сут.}}$ при работе ЭМКС на газодизельном (смешанном) топливе.

$$P_{Г\text{сум. г.д.т. сут.}} = P_{Г\text{сум. г.д.т. (д.с.)}} + P_{Г\text{сум. г.д.т. (н.с.)}} \quad (11)$$

Полученное значение суммарного расхода газа в течение одних суток $P_{Г\text{сум. г.д.т. сут.}}$, показывает объем (м^3) израсходованного природного газа, потребовавшегося на замещение в одни сутки ДТ.

$$P_{Г\text{сум. г.д.т. сут.}} \rightarrow \Delta P_{\text{сут.}} = (\Delta P_{\text{ом. (д.с.)}} + \Delta P_{\text{ом. (н.с.)}}) \quad (12)$$

где, $\Delta P_{\text{сут.}}$ – объем замещенного ДТ в течение одних суток, (л); $\Delta P_{\text{ом. (д.с.)}}$ – объем замещенного ДТ в дневную смену, (л); $\Delta P_{\text{ом. (н.с.)}}$ – объем замещенного ДТ в ночную смену, (л).

Репрезентативной считается выборка данных, для которых выполняются следующие условия:

- средняя скорость ЭМКС различается не более, чем на 1 км/ч;
- вес перевозимой взорванной горной массы за цикл различается не более чем на 5 тонн;
- расстояние транспортирования цикла различается не более чем на 0,5 км.

Расчет объемов израсходованного ДТ производится после фильтрации полученной информации за период мониторинга (цикл, смена, сутки). При расчете объемов израсходованного ДТ необходимо учитывать графические и цифровые шумы, дозправку карьерных самосвалов и периоды ожидания в зонах погрузки и разгрузки.

Оценка экономической эффективности эксплуатации модернизированных карьерных самосвалов с КБТС.

Экономическая оценка эффективности эксплуатации карьерных самосвалов с КБТС заключается в установлении приведенных годовых затрат Π , учитывающих капитальные и эксплуатационные затраты:

$$\Pi = KE + C \quad (13)$$

где, Π – приведенные годовые затраты, руб./год; K – капитальные затраты при автотранспорте, руб.; E – установленный коэффициент экономической эффективности капитальных вложений; C – эксплуатационные затраты, руб.

Приведенные годовые затраты рассчитываются для базовых и модернизированных (оснащенных КБТС) карьерных самосвалов. С учетом того, что самосвалы работают в идентичных горно-технических и горно-технологических условиях, формула приведенных годовых затрат принимает вид:

$$\Pi_i = E_i K_a + C_T \quad (14)$$

где, E – установленный коэффициент экономической эффективности капитальных вложений, i – индекс рассматриваемого карьерного самосвала (базовый или модернизированный), K_a – стоимость карьерного самосвала, (руб.), C_T – стоимость топлива, (руб.).

Стоимость топлива рассчитывается по следующей формуле:

$$C_T = (A_o R n a + N_T b) + C_{ДТ} \quad (15)$$

где, A_o – общий расход топлива за ходку, (тн); R – число ходок в сутки; n – число рабочих дней в год; a – стоимость 1 тонны израсходованного топлива (в

случае изменения стоимости топлива в течение года берется среднее значение за год), руб.; N_T – установленная мощность двигателя, кВт; b – годовой тариф на установленную мощность, (руб. за кВт); общая годовая стоимость доставки топлива до места заправки карьерных самосвалов $C_{ДТ}$, (руб.).

Если мощность двигателя, базового и модернизированного (оснащенного КБТС), карьерных самосвалов идентична, и если в стоимость 1 тонны израсходованного топлива уже включена стоимость доставки топлива до места заправки карьерных самосвалов, то вторым $N_T b$ и третьим слагаемыми формулы (15) можно пренебречь.

Определение фактического срока службы КБТС описывается следующим выражением.

$$T_{\text{ср.сл.}} = \frac{\Sigma T_p}{N} \quad (16)$$

где, $T_{\text{ср.сл.}}$ – средний срок службы; ΣT_p – сумма наработок на отказ всех КБТС; N – число КБТС.

В свою очередь, наработка на отказ одного КБТС рассчитывается как:

$$T_p = \left(\frac{N - n}{N} \right) \times t \quad (17)$$

где, N – число КБТС; n – число отказавших КБТС ко времени t ; t – время эксплуатации КБТС до отказа (моточасов).

Анализ причин ремонтов функционально-технологических групп КБТС с целью прогнозирования и предотвращения внеплановых простоев выполняется посредством стандартных статистических аппаратов (числовое или графическое распределение причин ремонтов за время эксплуатации).

Заключение

Представленная методика оценки технико-экономических показателей КБТС позволяет: качественно и количественно определить коэффициент замещения « K_3 дизельного топлива сжиженным природным газом при эксплуатации карьерных самосвалов в газодизельном режиме; оценить экономическую эффективность эксплуатации карьерных самосвалов, оснащенных КБТС; определить фактический срок службы КБТС и наработку на отказ одного объекта КБТС. Однако отсутствие на сегодняшний день (по причине инновационности данного направления) достаточных данных по статистике эксплуатации КБТС на карьерных самосвалах БелАЗ различных моделей и грузоподъемности дает предпосылки для дальнейшего совершенствования данного рода методик в свете динамично развивающихся проектов по использованию СПГ в качестве моторного топлива для тяжелой карьерной техники.

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. 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.

3. 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.

4. 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.

5. 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.

6. 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.

7. Quiros D.C., Smith J., Thiruvengadam A., Huai T. Greenhouse gas emissions from heavy-duty natural gas, hybrid, and conventional diesel on-road trucks during freight transport. // *Atmospheric Environment*. – 2017. – Vol. 168. – P. 36–45. DOI: org/10.1016/j.atmosenv.2017.08.066.

8. 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.

9. 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.

10. Goncharuk A.G., Havrysh V.I., Nitsenko V.S. National features for alternative motor fuels market // *International Journal of Energy Technology and Policy*. 2018. – Vol. 14, № 2-3. – P. 226-249. DOI: 10.1504/IJETP.2018.10010075.

11. Thiruvengadam A., Busch M., Carder D., Oshinuga A. *Journal of the Air & Waste Management Association*. – 2016. – Vol. 66, № 11. – P. 1045–1060. DOI: 10.1080/10962247.2016.1158751.

12. 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.

13. Патент № 2701133, Российская Федерация, МПК В60К 15/07, F17С 13/08 (2006.01). Способ установки криогенных топливных баков на карьерном самосвале: № 2019103118; заявл. 04.02.19; опубл. 24.09.19, Бюл. №27 / Нохрин С.А., Дубов Г.М., Трухманов Д.С.; заявитель ООО "Сибирь-Энерго". – 14 с.: 7 ил.

14. Carmichael D.G., Bartlett B.J., Kaboli A.S. Surface mining operations: coincident unit cost and emissions // *International Journal of Mining, Reclamation and Environment*. – 2014. – Vol. 28, № 1. – P. 4. DOI: 10.1080/17480930.2013.772699

15. Azikhanov S.S., Bogomolov A.R., Dubov G.M., Nokhrin 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/matecconf/201929703001.

16. Anisimov I., Ivanov A., Chikishev E. Assessment of adaptability of natural gas vehicles by the constructive analogy method // *International Journal of Sustainable Development and Planning*. – 2017. – Vol. 12, No 6. – P. 1006–1017. DOI: 10.2495/SDP-V12-N6-1006-1017.

17. Arteconi A., Brandoni C., Evangelist D., Polonara F. Life-cycle greenhouse gas analysis of LNG as a heavy vehicle fuel in Europe // *Applied Energy*, 87 (6), pp. 2005-2013, 2010 DOI: 10.1016/j.apenergy.2009.11.012.

18. 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.

19. 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.

20. 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.

21. 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.

Dmitriy S. Trukhmanov¹, Senior Lecturer, **Georgiy M. Dubov**^{1*}, C. Sc. in Engineering, Associate Professor, **Aleksey A. Chegoshev**¹, Senior Lecturer, **Ivan E. Eltsov**¹, undergraduate, **Sergey A. Nokhrin**² Deputy General Director for Gasification of Motor Transport

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

²«TekhnoEco» LLC, 11 Azovskaya St., Prokopyevsk, Russian Federation

*E-mail: nikokem@mail.ru

TECHNIQUE FOR EVALUATING COST-PERFORMANCE RATIO OF ON-BOARD CRYOGENIC FUEL SYSTEMS OF LNG-FUELLED BELAZ MINING DUMP TRUCKS

Abstract: The issue of the advantages of using liquefied natural gas (LNG) as a motor fuel for mining dump trucks instead of diesel fuel (DF) is considered. It is noted that the power consumption of the process of rock mass hauling by dual-fuel (gas-diesel) BelAZ mining dump trucks is less than that of the process of rock mass hauling by mining dump trucks running on diesel only. It is argued that the conversion of diesel engines of mining dump trucks to gas-diesel operation is very promising from the point of view of environmental and economic performance of heavy-duty mining equipment. A comprehensive universal technique for evaluating the cost-performance ratio of on-board cryogenic fuel systems (OBCFS), which are currently used on mining dump trucks, is presented. The method for evaluating the parameter "ratio of diesel fuel replacement with LNG" during the operation of BelAZ 75131 mining dump trucks equipped with OBCFS is described in detail. A possible sequence of cyclic, one-shift and daily monitoring of the parameter "ratio of diesel fuel replacement with LNG" is presented. The method for evaluating the economic efficiency of the use of heavy-duty mining dump trucks converted to gas-diesel operation is given, which allows, among other things, determining the actual service life of OBCFSs installed on BelAZ mining dump trucks and their time to failure.

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

Article info: received May 31, 2021

DOI: 10.26730/1816-4528-2021-3-32-38

REFERENCES

1. Dubov G.M., Trukhmanov D.S., Chegoshev A.A., Ashikhmin V.E. Substantiation of the need to create an ec-centric cycloidal gearing transmission of geokhod // IIIth International Innovative Mining Symposium: E3S Web Con-ferences. 41, 03008 (2018). DOI: 10.1051/e3sconf/20184103008.
2. 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.
3. 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.
4. 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.
5. 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.
6. 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.
7. Quiros D.C., Smith J., Thiruvengadam A., Huai T. Greenhouse gas emissions from heavy-duty natural gas, hy-brid, and conventional diesel on-road trucks during freight transport.// Atmospheric Environment. – 2017. – Vol. 168. – P. 36-45. DOI: org/10.1016/j.atmosenv.2017.08.066.
8. 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, 2019, no.4, pp.19-23. DOI: 10.14489/hb.2019.04.pp.019-023.

9. Kuznetsov I.V., Panachev I.A., Dubov G.M., Nokhrin S.A. Energy assessment of BelAZ-75131 gas-diesel min-ing dump trucks operation at Kuzbass open casts // Vth International Innovative Mining Symposium: E3S Web of Con-ferences. 174, 03010 (2020). DOI: 10.1051/e3sconf/202017403010.

10. Goncharuk A.G., Havrysh V.I., Nitsenko V.S. National features for alternative motor fuels market// Interna-tional Journal of Energy Technol-ogy and Policy. 2018. – Vol. 14, № 2-3. – P. 226-249. DOI: 10.1504/IJETP.2018.10010075.

11. Thiruvengadam A., Busch M., Carder D., Oshinuga A. Journal of the Air & Waste Manage-ment Association. – 2016. – Vol. 66, № 11. – P. 1045–1060. DOI: 10.1080/10962247.2016.1158751.

12. 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 Symposi-um: E3S Web of Conferences. 174, 03016 (2020). DOI: 10.1051/e3sconf/202017403016.

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

14. Carmichael D.G., Bartlett B.J., Kaboli A.S. Surface mining operations: coincident unit cost and emissions //International Journal of Mining, Recla-mation and Environment. – 2014. – Vol. 28, № 1. – P. 4. DOI: 10.1080/17480930.2013.772699

15. Azikhanov S.S., Bogomolov A.R., Dubov G.M., Nohrin S.A. Development of the instrumenta-tion system for gas-and-diesel fuelled BelAZ dump truck X International Scientific and Practical Con-ference // «INNOVATIONS IN MECHANICAL ENGINEERING» (ISPCIME 2019): MATEC Web

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

16. Anisimov I., Ivanov A., Chikishev E. As-sessment of adaptability of natural gas vehicles by the constructive analogy method // International Journal of Sustainable Development and Planning. – 2017. – Vol. 12, No 6. – P. 1006–1017. DOI: 10.2495/SDP-V12-N6-1006-1017.

17. Arteconi A., Brandoni C., Evangelist D., Polonara F. Life-cycle greenhouse gas analysis of LNG as a heavy ve-hicle fuel in Europe//Applied Energy, 87 (6), pp. 2005-2013, 2010 DOI: 10.1016/j.apenergy.2009.11.012.

18. 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 Sym-posium: E3S Web of Confer-ences 105, 03018 (2019). DOI: 10.1051/e3sconf/201910503018.

19. 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 Sym-posium: E3S Web of Confer-ences. 105, 03019 (2019). DOI:10.1051/e3sconf/201910503019.

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

22. 21. Khazin M.L. Transfer of mining dump trucks to gas under the conditions of the north. // Perm Journal of Petro-leum and Mining Engineer-ing, 2019, vol.19, no.1, pp.56-72. DOI: 10.15593/2224-9923/2019.1.5.

Библиографическое описание статьи

Трухманов Д.С., Дубов Г.М., Чегошев А.А., Ельцов И.Е., Нохрин С.А. Методология оценки технико-экономических показателей криогенных бортовых топливных систем карьерных самосвалов БелАЗ, потребляющих в качестве моторного топлива СПГ // Горное оборудование и электромеханика – 2021. – № 3 (155). – С. 32-38.

Reference to article

Trukhmanov D.S., Dubov G.M., Chegoshev A.A., Eltsov I.E., Nokhrin S.A. Technique for evaluat-ing cost-performance ratio of on-board cryogenic fuel systems of lng-fuelled belaz mining dump trucks. Mining Equipment and Electromechanics, 2021, no.3 (155), pp. 32-38.