

Научная статья

УДК 622.684

DOI: 10.26730/1816-4528-2026-4-104-112

Дубов Георгий Михайлович^{1*}, Нохрин Сергей Алексеевич², Якобсон Даниил Максимович¹,
Бороненков Данил Александрович¹

¹ Кузбасский государственный технический университет имени Т. Ф. Горбачева² Общество с ограниченной ответственностью «ТехноЭко»

* для корреспонденции: nikokem@mail.ru

ТЕПЛОВОЙ РАСЧЕТ ИСПАРИТЕЛЯ СЖИЖЕННОГО ПРИРОДНОГО ГАЗА ГАЗОДИЗЕЛЬНОГО КАРЬЕРНОГО САМОСВАЛА БелАЗ-75131



Информация о статье

Поступила:

12 июня 2026 г.

Одобрена после
рецензирования:

01 сентября 2026 г.

Принята к печати:

15 сентября 2026 г.

Ключевые слова:

карьерный самосвал БелАЗ,
газодизельный режим работы,
газомоторное топливо, сжи-
женный природный газ, крио-
генная бортовая топливная
система, испаритель

Аннотация.

Снижение себестоимости добычи полезных ископаемых и, в частности, угля, в сегодняшних непростых условиях жесткой конкуренции и санкционного давления является актуальной задачей. Одним из путей снижения затрат на добычу минеральных ресурсов является использование более дешевых энергетических ресурсов, используемых для транспортировки горной массы карьерными самосвалами. В настоящее время в Кузбассе получил широкое распространение проект по оснащению карьерных самосвалов БелАЗ криогенными бортовыми топливными системами (КБТС), позволяющими осуществлять эксплуатацию самосвалов в двухтопливном (газодизельном) режиме с использованием в качестве частичного замещения дизельного топлива сжиженного природного газа (СПГ). Одним из ключевых элементов КБТС газодизельного карьерного самосвала БелАЗ серии 75131 является испаритель сжиженного природного газа. В КБТС испаритель выполняет одну из ключевых функций, а именно перевод сжиженного природного газа в парообразное (газообразное) состояние и его дальнейший перегрев до необходимой положительной температуры. Для эффективного перевода сжиженного природного газа в парообразное состояние с учетом различного процента замещения дизельного топлива природным газом необходимым условием является обеспечение необходимой площади теплообмена в испарителе. В этой связи в представленной работе проведен тепловой расчет трехконтурного испарителя сжиженного природного газа, который включает в себя: расчет массовой теплоты сгорания природного газа; расчет тепловой мощности; объемного и массового расхода парообразного природного газа; расчет суммарного количества теплоты, необходимой для испарения и перегрева в испарителе метана. Полученные значения позволили получить необходимую площадь теплообмена трубчатых элементов в испарителе при 30%-ном и 50%-ном замещении дизельного топлива природным газом.

Для цитирования: Дубов Г.М., Нохрин С.А., Якобсон Д.М., Бороненков Д.А. Тепловой расчет испарителя сжиженного природного газа газодизельного карьерного самосвала БелАЗ-75131 // Горное оборудование и электромеханика. 2026. № 4 (186). С. 104-112. DOI: 10.26730/1816-4528-2026-4-104-112, EDN: BNZFH1

Введение

Для горнодобывающих компаний, ведущих разработку угольных месторождений в Кемеровской области – Кузбассе, снижение себестоимости открытой добычи является актуальной задачей. Одной из основных причин актуальности данной задачи является удаленность региона от ключевых потребителей угольной продукции, прежде всего зарубежных. Это в свою очередь приводит к удо-

рожению (за счет дополнительных транспортных расходов, постоянно растущих железнодорожных тарифов, несовершенной логистики, связанной с относительно низкой пропускной способностью железнодорожного трафика, прежде всего в восточном направлении) минеральных ресурсов, напрямую влияющему на конкурентоспособность угля и продуктов его переработки на мировых рынках.

Снижение себестоимости угледобычи – критическая задача для угольщиков Кузбасса из-за высокой доли транспортных составляющих в конечной цене, вызванной удаленностью от портов и зарубежных рынков. В условиях нестабильного спроса и логистических ограничений оптимизация производства напрямую определяет конкурентоспособность. Для повышения конкурентоспособности необходимы внедрение автоматизации, оптимизация открытых горных

средств карьерных самосвалов. В ключевых региональных угледобывающих компаниях на открытых горных работах наибольшую популярность получили карьерные самосвалы БелАЗ серии 7513 грузоподъемностью 130 т (Рис. 1) [3]. Это обусловлено рядом факторов и в том числе их мобильностью, маневренностью, быстротой окупаемости и т. д. [4].

По некоторым оценкам при использовании карьерных самосвалов стоимость транспортировки

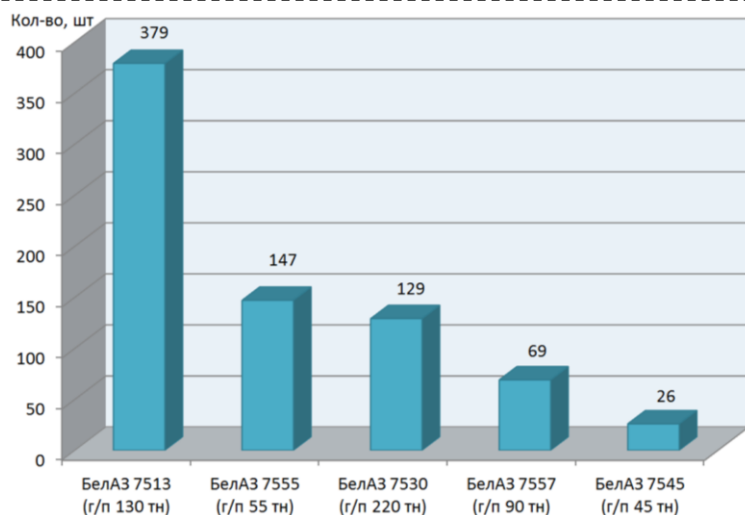


Рис. 1. Ключевая группа самосвалов БелАЗ, введенных в эксплуатацию в угледобывающих компаниях Кузбасса с 2014 по 2023 гг.

Fig. 1. The key group of BelAZ dump trucks commissioned by Kuzbass coal mining companies from 2014 to 2023

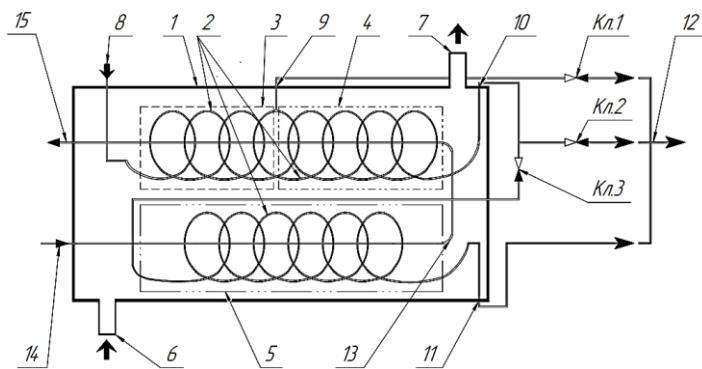


Рис. 2. Технологическая схема трехконтурного испарителя сжиженного природного газа

Fig. 2. Technological scheme of a three-circuit evaporator of liquefied natural gas

работ и повышение качества обогащения угля. Таким образом, снижение затрат является ключевым фактором выживания и развития отрасли региона в условиях долгосрочной экономической блокады со стороны западных стран [1].

В последнее десятилетие в Кузбассе, одном из ведущих угледобывающих регионов Российской Федерации, наибольшее распространение при добыче угля получила разработка месторождений открытым способом [2]. На разрезах транспортировка горной массы (вскрышных пород и угля) в подавляющем большинстве осуществляется по-

горной массы составляет от 30 до 70% от общей себестоимости добычи полезных ископаемых [5–6]. При транспортировке вскрышных пород и угля карьерными самосвалами БелАЗ серии 75131 по технологическим трассам разрезов одной из наиболее емких статей расходов являются затраты на горюче-смазочные материалы (ГСМ) и, в частности, дизельное топливо. Согласно руководству по эксплуатации карьерного самосвала БелАЗ серии 75131, оснащенного дизельным двигателем Cummins KTA50 с рабочим объемом 50 литров и мощностью 1194 кВт (1600 л.с.), удельный расход дизельного топлива при номинальной мощности составляет 208 г/кВт·ч [7].

Одним из перспективных направлений по снижению затрат при транспортировке тяжелыми карьерными самосвалами вскрышных пород и угля является замена традиционного дизельного топлива на альтернативные энергоносители, в частности, сжиженный природный газ (СПГ) [8]. На сегодняшний день разработан и запатентован способ по модернизации карьерных самосвалов БелАЗ серии 75131 для их последующей эксплуатации в газодизельном режиме с использованием СПГ [9–11]. Разработана криогенная бортовая топливная система (КБТС), устанавливаемая на борту БелАЗ-75131 и успешно зарекомендовавшая себя при эксплуатации в реальных производственных условиях на участках горных выработок

[12].

Цель работы

Провести тепловой расчет испарителя, входящего в состав КБТС, позволяющий определить необходимую

и достаточную площадь теплопередачи для испарения сжиженного и перегрева парообразного природного газа метан в случаях при 30%-ном и 50%-ном замещении дизельного топлива газовым.

Методы исследования

Объектом исследования является разработанный трехконтурный испаритель сжиженного при-

родного газа, входящий в состав КБТС газодизельного карьерного самосвала БелАЗ-75131, технологическая схема которого представлена на Рис. 2. Предметом исследования являлся тепловой расчет системы испарения.

Трехконтурный испаритель содержит (Рис. 2): цилиндрический корпус 1; совокупность спиральных трубчатых теплообменных элементов 2, состоящую из спиральных трубчатых змеевиков 3, 4, 5 диаметром 20 мм и изготовленных из нержавеющей стали 12Х18Н10Т, хорошо компенсирующей температурные удлинения; входной канал теплоносителя 6; выходной канал теплоносителя 7; входной канал сжиженного природного газа 8 в совокупность спиральных трубчатых теплообменных элементов 2; выходные каналы испаренного и перегретого природного газа 9, 10, 11, обеспечивающие его выход из спиральных трубчатых змеевиков 3, 4, 5 соответственно; общий коллектор подачи газа 12 в двигатель внутреннего сгорания Cummins КТА-50 газодизельного карьерного самосвала БелАЗ-75131; управляющий испаритель 13 для поддержания постоянного рабочего давления в криогенном топливном баке (линия подогрева) и место входа 14 и выхода 15 управляющего испарителя 13 из цилиндрического корпуса 1 трехконтурного испарителя. Принцип трехконтурности испарителя обеспечивает эффективную трансформацию сжиженного природного газа в парообразное состояние в зависимости от температуры окружающей среды в летний, осенне-весенний и зимний периоды времени года [13].

В КБТС, установленной на борту газодизельного карьерного самосвала БелАЗ-75131, трехконтурный испаритель выполняет роль трансформации природного газа из сжиженного состояния в парообразную (газообразную) фазу при давлении 15 кгс/см², обеспечивая при этом процесс фазового перехода из жидкого состояния при температуре –115°С с энтальпией $i'' = -178$ ккал/кг (–745,8 кДж/кг) до состояния насыщенного пара с энтальпией $i' = -77$ ккал/кг (–322,6 кДж/кг), перегрев газа от температуры –115°С до температуры +40°С (парообразное состояние) с энтальпией $i''' = 13$ ккал/кг (54,5 кДж/кг). Рациональной температурой перегрева газа является именно эта температура, а не выше, из соображения понижающейся плотности с повышением температуры, при которой также понижается энергетический заряд, подающийся для замещения части дизельного топлива. В качестве теплоносителя в трехконтурном испарителе используется охлаждающая жидкость тосол, подаваемая из системы охлаждения двигателя Cummins КТА-50 газодизельного карьерного самосвала БелАЗ-75131.

Экономически обоснованным (эффективным) и оптимальным объемом замещения дизельного топлива газовым при эксплуатации карьерных самосвалов БелАЗ-75131 в газодизельном режиме принято считать от 30% до 50%. При проведении тепловых расчетов трехконтурного испарителя мощность дизельного двигателя Cummins КТА-50 была

округлена до значения $N_d = 1200$ кВт (паспортное значение: $N_d = 1194$ кВт) [7]. Расчетным путем была пропорционально соотнесена мощность двигателя Cummins КТА-50 в соответствии с необходимым процентом замещения, в частности, при 30%-ном замещении дизельного топлива газовым мощность двигателя, обеспеченная газом, составила $N_{d.zam.30\%} = 360$ кВт, а при 50%-ном замещении $N_{d.zam.50\%} = 600$ кВт.

В соответствии с ГОСТ 34894-2022 сжиженный природный газ марки Б, используемый в качестве моторного топлива для двигателей внутреннего сгорания, должен содержать не менее 80% молярной доли метана CH₄. Плотность состава смеси массы (ρ_{sm}) парообразного природного газа метан CH₄, включающего в себя, кроме того, такие основные горючие газы, как этан C₂H₆, пропан C₃H₈, изобутан, норм-бутан и т. д., определена расчетным путем и составила $\rho_{sm} = 0,73$ кг/м³. Это значение соответствует и входит в диапазон справочных нормативных значений.

Массовая теплота сгорания природного газа метан CH₄ определялась по следующей формуле [14–15]:

$$Q_n^G = \frac{Q_n^V}{\rho_{sm}} = \frac{34,15}{0,73} = 46,78 \text{ МДж/кг}, \quad (1)$$

где Q_n^V – объемная теплота сгорания испаренного сжиженного природного газа марки Б (согласно результатам анализа в аккредитованной лаборатории ОАО «Западно-сибирского испытательного центра» составила 34,15 МДж/м³);

ρ_{sm} – плотность смеси массы парообразного природного газа метан CH₄, кг/м³.

Тепловая мощность N_t , необходимая для 30%-ного и 50%-ного замещения дизельного топлива газовым и соответственно обеспечения мощностных характеристик двигателя Cummins КТА-50 $N_{d.zam.30\%} = 360$ кВт и $N_{d.zam.50\%} = 600$ кВт, определялась по следующим выражениям:

$$N_{t30\%} = \frac{N_{d.zam.30\%}}{\eta} = \frac{360}{0,45} = 800 \text{ кВт}, \quad (2)$$

где $N_{d.zam.30\%}$ – мощность замещения дизельного топлива газовым, (кВт); η – КПД двигателя (0,45).

$$N_{t50\%} = \frac{N_{d.zam.50\%}}{\eta} = \frac{600}{0,45} = 1333,3 \text{ кВт}, \quad (3)$$

где $N_{d.zam.50\%}$ – мощность замещения дизельного топлива газовым, кВт.

Объемный расход $V_{pg.zam}$ парообразного природного газа при 30%-ном и 50%-ном замещении дизельного топлива газовым определялся по следующим выражениям:

$$V_{pg.zam30\%} = \frac{N_{t30\%}}{Q_n^V} = \frac{800}{34150} = 0,0234 \text{ нм}^3/\text{с} = 84,24 \text{ нм}^3/\text{час}, \quad (4)$$

$$V_{pg.zam50\%} = \frac{N_{t50\%}}{Q_n^V} = \frac{1333,3}{34150} = 0,039 \text{ нм}^3/\text{с} = 140,55 \text{ нм}^3/\text{час}, \quad (5)$$

где Q_n^V – объемная теплота сгорания испаренного сжиженного природного газа (34,15 МДж/м³ = 34150 кДж/м³);

$N_{t30\%}$ – тепловая мощность, необходимая для 30%-ного замещения дизельного топлива газовым, (кВт);

$N_{t50\%}$ – тепловая мощность, необходимая для 50%-ного замещения дизельного топлива газовым, (кВт).

Массовый расход $G_{pg.zam}$ парообразного природного газа при 30%-ном и 50%-ном замещении дизельного топлива газовым определялся по следующим выражениям:

$$G_{pg.zam30\%} = \frac{N_{t30\%}}{Q_n^G} = \frac{800}{46780} = 0,017 \text{ кг/сек} = 61,2 \text{ кг/час}, \quad (6)$$

$$G_{pg.zam50\%} = \frac{N_{t50\%}}{Q_n^G} = \frac{1333,3}{46780} = 0,029 \text{ кг/сек} = 104,4 \text{ кг/час}, \quad (7)$$

где Q_n^G – массовая теплота сгорания испаренного сжиженного природного газа (46,78 МДж/кг = 46780 кДж/кг);

$N_{t30\%}$ – тепловая мощность необходимая для 30% замещения дизельного топлива газовым, (кВт);

$N_{t50\%}$ – тепловая мощность необходимая для 50% замещения дизельного топлива газовым, (кВт).

Плотность состава смеси массы (ρ_{lsm}) сжиженного природного газа метан CH_4 , включающего в себя, кроме того, такие основные горючие газы, как этан C_2H_6 , пропан C_3H_8 , изо-бутан, норм-бутан и т. д., определена расчетным методом и составила $\rho_{lsm} = 414,34 \text{ кг/м}^3$. Это значение также соответствует и входит в диапазон справочных норматив-

ных значений.

В этом случае объемный расход V_{spg} сжиженного природного газа при 30%-ном и 50%-ном замещении дизельного топлива газовым определялся по следующим выражениям:

$$V_{spg 30\%} = \frac{G_{pg.zam30\%}}{\rho_{lsm}} = \frac{0,017}{414,34} = 4,10 \cdot 10^{-5} \text{ м}^3/\text{сек} = 0,147 \text{ м}^3/\text{час} = 147 \text{ л/час}, \quad (8)$$

$$V_{spg 50\%} = \frac{G_{pg.zam50\%}}{\rho_{lsm}} = \frac{0,029}{414,34} = 7,0 \cdot 10^{-5} \text{ м}^3/\text{сек} = 0,252 \text{ м}^3/\text{час} = 252 \text{ л/час}, \quad (9)$$

где $G_{pg.zam30\%}$ – массовый расход парообразного природного газа при 30% замещении дизельного топлива газовым, (кг/с);

$G_{pg.zam50\%}$ – массовый расход парообразного природного газа при 50% замещении дизельного топлива газовым, (кг/с);

ρ_{lsm} – плотность смеси массы сжиженного природного газа метан CH_4 , (кг/м³).

Результаты и обсуждения

Для расчета количества теплоты, необходимой для испарения сжиженного природного газа в испарителе, использовалась диаграмма состояния метана Павловича Н. В., полученная по экспериментальным данным (Рис. 3). Данная диаграмма отражает изменение фазовых состояний метана (пар-жидкость) в зависимости от термодинамических параметров газа

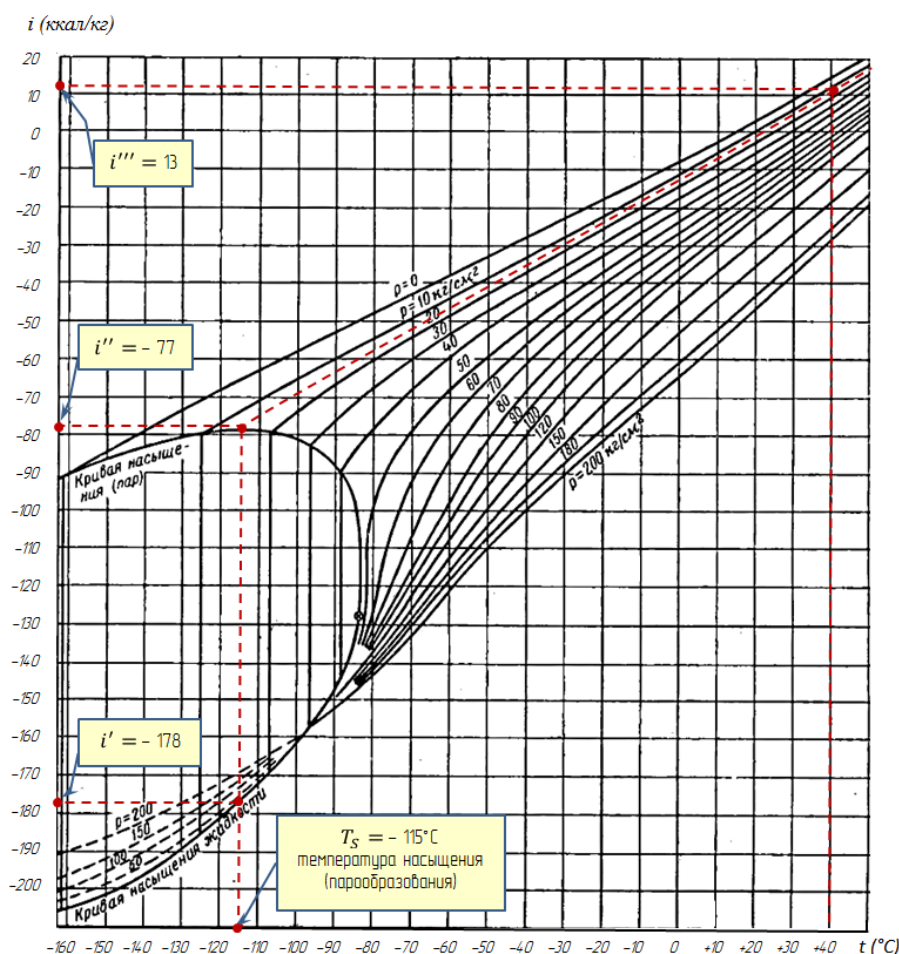


Рис. 3. Диаграмма изменения фазовых состояний метана (пар-жидкость)
Fig. 3. Diagram of changes in the phase states of methane (vapor-liquid)

[16].

На первоначальном этапе по диаграмме (Рис. 3) было определено количество теплоты (q_{isp}), необходимое

и достаточное для испарения 1 кг сжиженного природного газа метан:

$$q_{isp} = 4,186 \cdot (i'' - i') = 4,186 \cdot ((-77 - (-178))) = 422,8 \text{ кДж/кг}, \quad (10)$$

где 4,186 – переводной коэффициент килокалории в килоджоули (1 ккал = 4,186 кДж).

Далее определено количество теплоты (q_{per}), необходимое и достаточное для перегрева 1 кг парообразного метана от температуры насыщения $T_S = -115^\circ\text{C}$ (Рис. 3) до минимальной температуры $t_i = +40^\circ\text{C}$, которая должна быть на выходе из испарителя:

$$q_{per} = \rho_{ism} \cdot (i''' - i'') = 4,186 \cdot ((13 - (-77))) = 377 \text{ кДж/кг}, \quad (11)$$

Таким образом, суммарное количество теплоты (Σq), необходимое для испарения (q_{isp}) и перегрева (q_{per}) 1 кг газа в испарителе, составило:

$$\Sigma q = q_{isp} + q_{per} = 422,8 + 377 = 799,8 \text{ кДж/кг}, \quad (12)$$

Далее представлены выражения, по которым определено суммарное количество теплоты (ΣQ), необходимой для испарения и перегрева в испарителе метана при замещении 30% (расход 0,017 кг/сек) и 50% (расход 0,029 кг/сек) дизельного топлива природным газом:

$$\Sigma Q_{30\%} = G_{pg.zam30\%} \cdot \Sigma q = 0,017 \cdot 799,8 = 13,6 \text{ кВт}; \quad (13)$$

$$\Sigma Q_{50\%} = G_{pg.zam50\%} \cdot \Sigma q = 0,029 \cdot 799,8 = 23,2 \text{ кВт}. \quad (14)$$

где Σq – суммарное количество теплоты, необходимое для испарения и перегрева природного газа в испарителе в количестве 1 кг, (кДж/кг);

$G_{pg.zam30\%}$ – массовый расход природного газа при 30%-ном замещении дизельного топлива газом, (кг/сек);

$G_{pg.zam50\%}$ – массовый расход природного газа при 50%-ном замещении дизельного топлива газом, (кг/сек);

Для проведения дальнейших расчетов испаритель виртуально был разбит на два участка:

– участок поверхности испарителя, где осуществляется процесс испарения (кипения) метана (F_{isp});

– участок поверхности испарителя, где осуществляется процесс перегрева парообразного метана (F_{per}).

Средний температурный напор на участке испарения (Δt_{isp}) сжиженного метана, а также на участке перегрева (Δt_{per}) парообразного метана принимается из известных эксплуатационных условий:

$$\Delta t_{isp} = t_{tos} - T_S = 80 - (-115) = 195^\circ\text{C}, \quad (15)$$

где t_{tos} – температура теплоносителя (охлаждающей жидкости тосол), ($^\circ\text{C}$);

T_S – температура парообразования газа, ($^\circ\text{C}$).

$$\Delta t_{per} = t_{tos} - t_{sr.pg} = 80 - (-77,5) = 157,5^\circ\text{C}, \quad (16)$$

где t_{tos} – температура теплоносителя (охлаждающей жидкости тосол), ($^\circ\text{C}$);

$t_{sr.pg}$ – средняя температура природного газа, $^\circ\text{C}$.

Средняя температура природного газа ($t_{sr.pg}$) определяется по следующему выражению:

$$t_{sr.pg} = \frac{t_i - (T_S)}{2} = \frac{40 - (-115)}{2} = -77,5^\circ\text{C}, \quad (17)$$

где t_i – минимально необходимая температура парообразного метана, выходящего из испарителя, ($^\circ\text{C}$);

T_S – температура сухого насыщенного пара, ($^\circ\text{C}$).

Полученные выше энергетические и тепловые значения позволили на заключительном этапе определить необходимую и достаточную площади теплопередачи (при положительных температурах окружающей среды) для совокупности спиральных трубчатых теплообменных элементов 2, состоящей из спиральных трубчатых змеевиков 3, 4, 5 (Рис. 2). В частности, для обеспечения замещения дизельного топлива природным газом метан на 30% и 50%, компенсирующей мощность двигателя $N_{d.zam} = 360$ и 600 кВт соответственно, площади теплопередачи для испарения (F_{isp}) и перегрева (F_{per}) природного газа определялись по следующим выражениям:

– площадь теплопередачи для испарения (F_{isp}) при замещении дизельного топлива газом на 30% и 50%:

$$F_{isp30\%} = \frac{G_{pg.zam30\%} \cdot q_{isp}}{k_{isp} \cdot \Delta t_{isp}} = \frac{0,017 \cdot 422,8 \cdot 10^3}{180 \cdot 195} = 0,205 \text{ м}^2, \quad (18)$$

$$F_{isp50\%} = \frac{G_{pg.zam50\%} \cdot q_{isp}}{k_{isp} \cdot \Delta t_{isp}} = \frac{0,029 \cdot 422,8 \cdot 10^3}{180 \cdot 195} = 0,350 \text{ м}^2, \quad (19)$$

где $G_{pg.zam30\%}$ – массовый расход газа при 30%-ном замещении, (кг/сек);

$G_{pg.zam50\%}$ – массовый расход газа при 50%-ном замещении, (кг/сек);

q_{isp} – количество теплоты для испарения 1 кг сжиженного метана, (кДж/кг);

k_{isp} – коэффициент теплопередачи на испарение (в первом приближении $k_{isp} = 180$ (Вт/(м² · К));

Δt_{isp} – средний температурный напор на участке испарения, ($^\circ\text{C}$).

– площадь теплопередачи для перегрева (F_{per}) при замещении дизельного топлива газом на 30% и 50%:

$$F_{per30\%} = \frac{G_{pg.zam30\%} \cdot q_{per}}{k_{per} \cdot \Delta t_{per}} = \frac{0,017 \cdot 377 \cdot 10^3}{30 \cdot 157,5} = 1,36 \text{ м}^2 \quad (20)$$

$$F_{per50\%} = \frac{G_{pg.zam50\%} \cdot q_{per}}{k_{per} \cdot \Delta t_{per}} = \frac{0,029 \cdot 377 \cdot 10^3}{30 \cdot 157,5} = 2,31 \text{ м}^2 \quad (21)$$

где $G_{pg.zam30\%}$ – массовый расход газа при 30%-ном замещении, (кг/сек);

$G_{pg.zam50\%}$ – массовый расход газа при 50%-ном замещении, (кг/сек);

q_{per} – количество теплоты для перегрева 1 кг парообразного метана, (кДж/кг);

k_{per} – коэффициент теплопередачи на перегрев (в первом приближении $k_{per} = 30$ (Вт/(м² · К));

Δt_{per} – средний температурный напор на участке перегрева, (°C).

Суммируя полученные выше значения, получаем общую площадь теплопередающей поверхности (F_{obsh}) спиральных трубчатых теплообменных элементов (Рис. 2), необходимую и достаточную для испарения сжиженного и перегрева парообразного природного газа при 30%-ном и 50%-ном замещении дизельного топлива природным газом:

$$F_{obsh30\%} = F_{isp30\%} + F_{per30\%} = 0,205 + 1,36 = 1,565 \text{ м}^2 \approx 1,6 \text{ м}^2 \quad (22)$$

$$F_{obsh50\%} = F_{isp50\%} + F_{per50\%} = 0,350 + 2,31 = 2,66 \approx 2,7 \text{ м}^2 \quad (23)$$

Выводы

1. Представленная методика расчета трехконтурного испарителя сжиженного природного газа позволяет полноценно выявить тепловые, энергетические и эксплуатационные показатели работоспособности рассматриваемого теплообменного аппарата для различных случаев процентного замещения дизельного топлива природным газом метан. Данное обстоятельство говорит об универсальности и возможности использования данной методики расчета по отношению к другим, подобного рода, испарителям (регазификаторам).

2. Использование диаграммы фазовых состояний метана (пар-жидкость) Павловича Н. В. позволило достоверно выявить тепловые значения и определить размерные характеристики теплопередающей поверхности спиральных трубчатых элементов, позволяющей осуществлять эффективную трансформацию природного газа из сжиженного состояния в парообразную форму с последующим его перегревом до необходимой для дальнейшей подачи в двигатель внутреннего сгорания Cummins KTA-50 минимальной температуры $t_i = +40^\circ\text{C}$.

3. Проведенные расчеты показали, что для перевода сжиженного природного газа в парообразное состояние и доведение его температуры до $+40^\circ\text{C}$ при замещении дизельного топлива газовым на 30% необходима площадь теплообмена должна составлять $\geq 1,6 \text{ м}^2$, а при 50%-ном замещении дизельного топлива газовым $\geq 2,7 \text{ м}^2$. Данное условие применимо при использовании спиральных трубчатых змеевиков диаметром 20 мм и изготовленных из нержавеющей стали 12Х18Н10Т.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Министерство энергетики Российской Федерации. Энергетическая стратегия Российской Федерации до 2050 года (утверждена распоряжением Правительства Российской Федерации от 12 апреля 2025 г. № 908-р) [Электронный ресурс]. URL:

<https://minenergo.gov.ru/ministry/energy-strategy> (дата обращения: 07.04.2026).

2. Копытов А. И., Куприянов О. А., Манаков Ю. А., Куприянов А. Н. Добыча угля в Кузбассе и новые экотехнологии // ЭКО. 2021. № 6(564). С. 67–76.

3. Дубов Г. М., Кузнецов И. В., Кульпин А. Г., Нохрин С. А., Панченко К. В. Обоснование композитного решения по размещению криогенных топливных баков на палубе самосвала БЕЛАЗ-75131. Статический расчет // Горное оборудование и электромеханика. 2025. № 3(179). С. 30–40. DOI: 10.26730/1816-4528-2025-3-30-40.

4. Городниченко В. И., Дмитриев А. П. Основы горного дела: М. : Горная книга, 2008. 510 с.

5. 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.

6. Кузнецов И. В. Оценка ресурса металлоконструкций задних мостов автосамосвалов при эксплуатации на разрезах Кузбасса: Дис. канд. техн. наук по специальности 05.05.06 «Горные машины». Кемерово, 2015. 112 с.

7. Карьерные самосвалы серии БЕЛАЗ-7513: БЕЛАЗ-7513, БЕЛАЗ-75131, БЕЛАЗ-75135, БЕЛАЗ-75137, БЕЛАЗ-75139, БЕЛАЗ-7513А, БЕЛАЗ-7513В. Руководство по эксплуатации 75131-3902015 РЭ // ОАО «БЕЛАЗ» – управляющая компания холдинга «БЕЛАЗ-ХОЛДИНГ». 2015. 248 с.

8. Тарасов П. И., Хазин М. Л., Фурзиков В. В. Факторы, предопределяющие выбор энергоносителя для силовых агрегатов горной и транспортной техники карьеров Якутии // Горная Промышленность. 2017. № 3. С. 56–59.

9. Ельцов И. Е., Чегошев А. А., Нохрин С. А. Реконструкция палубы карьерного самосвала БЕЛАЗ 75131 для обеспечения его эксплуатации в газодизельном режиме // Инновации в машиностроении: сборник трудов XII Международной научно-практической конференции. Новосибирск : Изд-во НГТУ, 2021. С. 303–310.

10. Патент № 2701133. Российская Федерация, МПК В60К 15/07 (2006.01), F17C 13/08 (2006.01). Способ установки криогенных топливных баков на карьерном самосвале / Нохрин С. А., Дубов Г. М., Трухманов Д. С.; заявитель и патентообладатель Общество с ограниченной ответственностью «Сибирь-Энерго» (ООО «Сибирь-Энерго»). № 2019103118; заявл. 04.02.2019; опубл. 24.09.2019. 14 с.: ил.

11. Dubov G., Trukhmanov D. Nokhrin S., Sergel A. Method for installing cryogenic fuel tanks on the deck of BelAZ 7513 mining dump truck // E3S Web of Conferences 174. Vth International Innovative Mining Symposium, IIMS 2020: Electronic edition. 2020. Art. 03016.

12. Патент № 2856533. Российская Федерация, МПК F02M 21/02 (2006.01), F02M 21/06 (2006.01), F02M 37/00 (2006.01). Криогенная бортовая топ-

ливная система карьерных самосвалов / Дубов Г. М., Нохрин С. А., Богомолов А. Р., Турушев С. В., Черниченко А. В., Шарифуллин М. К.; патентообладатель Дубов Г. М., Нохрин С. А., Богомолов А. Р. № 2025114025; заявл. 23.05.2025; опубл. 24.02.2026. 10 с.: ил.

13. Патент № 236025. Российская Федерация, МПК F17C 9/02 (2006.01). Испаритель сжиженного природного газа / Дубов Г. М., Нохрин С. А., Богомолов А. Р., Турушев С. В., Черниченко А. В., Шарифуллин М. К.; патентообладатель Дубов Г. М., Нохрин С. А., Богомолов А. Р. № 2025108960; заявл. 07.04.2025; опубл. 22.07.2025. 8 с.: ил.

14. Петрик П. Т., Афанасьев Ю. О., Богомолов А. Р., Дворовенко И. В. Основы теплотехники и энергосбережение: учеб. пособие под ред. П.Т. Петрика; ГУ КузГТУ. Кемерово, 2006. 244 с.

15. Павлов К. Ф., Романков П. Г., Носков А. А. Примеры задач по курсу процессов и аппаратов химической технологии. Учебное пособие для вузов; под ред. чл.-корр. АН СССР П. Г. Романкова. 10-е изд., перераб. и доп. Л.: Химия, 1987. 567 с.

16. Павлович Н. В. Справочник по теплофизическим свойствам природных газов и их компонентов. Л.: Госэнергоиздат, 1962. 120 с.

© 2026 Авторы. Эта статья доступна по лицензии Creative Commons «Attribution» («Атрибуция») 4.0 Всемирная (<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>)

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Об авторах:

Дубов Георгий Михайлович, кандидат технических наук, доцент кафедры горных машин и комплексов, Кузбасский государственный технический университет имени Т. Ф. Горбачева (Россия, 650000, г. Кемерово, ул. Весенняя, 28), ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-5383-8884>, e-mail: nikokem@mail.ru.

Нохрин Сергей Алексеевич, заместитель генерального директора, общество с ограниченной ответственностью «ТехноЭКО» (Россия, 653046, г. Прокопьевск, ул. Азовская, 11), e-mail: nsa500@mail.ru.

Якобсон Даниил Максимович, аспирант, Кузбасский государственный технический университет имени Т. Ф. Горбачева, (Россия, 650000, г. Кемерово, ул. Весенняя, 28), e-mail: daneel3000@gmail.com.

Бороненков Данил Александрович, аспирант, Кузбасский государственный технический университет имени Т. Ф. Горбачева (Россия, 650000, г. Кемерово, ул. Весенняя, 28), e-mail: daniil.boronenkov@inbox.ru.

Заявленный вклад авторов:

Дубов Георгий Михайлович – научный менеджмент, концептуализация исследования и расчетов, выводы.

Нохрин Сергей Алексеевич – расчеты, написание текста.

Даниил Максимович Якобсон – обработка результатов.

Данил Александрович Бороненков – обзор литературы, сбор и анализ данных.

Все авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.

Original article

DOI: 10.26730/1816-4528-2026-4-104-112

Georgiy M. Dubov^{1*}, Sergey A. Nokhrin², Daniil M. Yakobson¹, Danil A. Boronenkov¹

¹ T.F. Gorbachev Kuzbass State Technical University

² «TekhnoEco» LLC

* for correspondence: nikokem@mail.ru

THERMAL CALCULATION OF A LIQUEFIED NATURAL GAS EVAPORATOR BELAZ-75131 GAS-DIESEL MINING DUMP TRUCK



Article info

Received:

12 June 2026

Abstract.

Reducing the cost of mining minerals, and coal in particular, is an urgent task in today's difficult conditions of fierce competition and sanctions pressure. One of the ways to reduce the cost of extracting mineral resources is to use cheaper energy resources used for transporting rock mass by quarry dump trucks. Currently, a project to equip BelAZ mining dump trucks with cryogenic on-board fuel systems (CBTS) has become widespread in Kuzbass, allowing them to operate in a dual-fuel (gas-diesel) mode using

Accepted for publication:
01 September 2026

Accepted:
15 September 2026

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

liquefied natural gas (LNG) as a partial replacement for diesel fuel. One of the key elements of the CBTS of the BelAZ 75131 series gas-diesel mining dump truck is a liquefied natural gas evaporator. In CBTS, the evaporator performs one of the key functions, namely, the conversion of liquefied natural gas to a vaporous (gaseous) state and its further overheating to the required positive temperature. To effectively convert liquefied natural gas to a vapor state, taking into account the different percentage of diesel fuel replacement with natural gas, it is necessary to ensure the necessary heat exchange area in the evaporator. In this regard, in the presented work, a thermal calculation of a three-circuit evaporator of liquefied natural gas is carried out, which includes: calculation of the mass heat of combustion of natural gas; calculation of thermal power; volume and mass consumption of vaporous natural gas; calculation of the total amount of heat required for evaporation and overheating in the methane evaporator. The obtained values made it possible to obtain the required heat exchange area of the tubular elements in the evaporator with 30% and 50% substitution of diesel fuel with natural gas.

For citation: Dubov G.M., Nokhrin S.A., Yakobson D.M., Boronenkov D.A. Thermal Calculation of a Liquefied Natural Gas Evaporator BelAZ-75131 Gas-Diesel mining Dump Truck. Mining Equipment and Electromechanics, 2026; 4(186):104-112 (In Russ., abstract in Eng.). DOI: 10.26730/1816-4528-2026-4-104-112, EDN: BNZFHI

REFERENCES

1. The Ministry of Energy of the Russian Federation. The Energy Strategy of the Russian Federation until 2050 (approved by Decree of the Government of the Russian Federation dated April 12, 2025, № 908-r) [Electronic resource]. URL: <https://minenergo.gov.ru/ministry/energy-strategy> (date of request: 04.07.2026).
2. Kopytov A.I., Kupriyanov O.A., Manakov Yu.A., Kupriyanov A.N. Coal mining in Kuzbass and new eco-technologies. *ECO*. 2021; 6(564):67-76.
3. Dubov G.M., Kuznetsov I.V., Kulpin A.G., Nokhrin S.A., Panchenko K.V. Justification of the layout solution for the placement of cryogenic fuel tanks on the deck of the BELAZ-75131 dump truck. Static calculation. *Mining equipment and electromechanics*. 2025; 3(179):30-40. DOI: 10.26730/1816-4528-2025-3-30-40.
4. Gorodnichenko V.I., Dmitriev A.P. Fundamentals of mining: Moscow: Gornaya kniga; 2008. 510 p.
5. Khazin M.L. Transfer of mining dump trucks to gas under the conditions of the north. *Perm Journal of Petroleum and Mining Engineering*. 2019; 19(1):56-72. DOI: 10.15593/2224-9923/2019.1.5.
6. Kuznetsov I.V. Assessment of the resource of metal structures of dump truck rear axles during operation in the Kuzbass mines: PhD Candidate of Technical Sciences, specialty 05.05.06 "Mining machinery". Kemerovo, 2015. 112 p.
7. BELAZ-7513 series mining dump trucks: BELAZ-7513, BELAZ-75131, BELAZ-75135, BELAZ-75137, BELAZ-75139, BELAZ-7513A, BELAZ-7513B. Operation manual 75131-3902015 RE. OAO BELAZ – the management company of BELAZ-HOLDING. 2015. 248 p.
8. Tarasov P.I., Khazin M.L., Furzikov V.V. Factors that determine choice of the source of energy source of energy for power units of mining and transport equipment quarries in Yakutia. *Mining Industry Journal*. 2017; 3:56-59.
9. Yeltsov I.E., Chegoshchev A.A., Nokhrin S.A. Reconstruction of the BelAZ 75131 dump truck deck to ensure its operation in gas-diesel mode. *Innovations in mechanical engineering: proceedings of the XII International Scientific and Practical Conference*. Novosibirsk: NSTU Publishing House; 2021. Pp. 303-310.
10. Patent № 2794478. Russian Federation, MPK B60K 15/07 (2006.01). Method of installation of cryogenic fuel tank on a quarry dump truck: № 2022133441; avt. 19.12.2022; published 19.04.2023 / Drobin I.V., Nokhrin S.A., Dubov G.M., Trukhmanov D.S., Chegoshchev A.A., Chernichenko A.V., Amosov A.A.; applicant Limited Liability Company «TechnoEco». 16 p.
11. Dubov G., Trukhmanov D. Nokhrin S., Sergel A. Method for installing cryogenic fuel tanks on the deck of BelAZ 7513 mining dump truck. *E3S Web of Conferences* 174. *Vth International Innovative Mining Symposium*. IIMS 2020: Electronic edition. 2020. Art. 03016.
12. Patent № 2856533. Russian Federation, IPC F02M 21/02 (2006.01), F02M 21/06 (2006.01), F02M 37/00 (2006.01). Cryogenic on-board fuel system for mining dump trucks / Dubov G.M., Nokhrin S.A., Bogomolov A.R., Turushev S.V., Chernichenko A.V., Sharifullin M.K.; patent holder Dubov G.M., Nokhrin S.A., Bogomolov A.R. № 2025114025; application. 05/23/2025; published. 02/24/2026 10 p.: ill.
13. Patent № 236025. Russian Federation, IPC F17C 9/02 (2006.01). Liquefied natural gas evaporator / Dubov G.M., Nokhrin S.A., Bogomolov A.R., Turushev S.V., Chernichenko A.V., Sharifullin M.K.; patent holder Dubov G.M., Nokhrin S.A., Bogomolov A.R. № 2025108960; application. 04/07/2025; publ. 07/22/2025. 8 p.: ill.
14. Petrik P.T., Afanasyev Yu.O., Bogomolov A.R., Dvorovenko I.V. Fundamentals of heat engineering

and energy conservation: textbook. manual edited by P.T. Petrik. Kemerovo: GU KuzGTU; 2006. 244 p. (in Russian)

15. Pavlov K.F., P.G. Romankov, A.A. Noskov Examples of tasks in the course of processes and devices of chemical technology. Textbook for universities;

edited by corresponding member. Academy of Sciences of the USSR P.G. Romankov. 10th ed., revised and additional materials. L.: Chemistry; 1987. 567 p.

16. Pavlovich N.V. Handbook of the thermophysical properties of natural gases and their components. Moscow: Gosenergoizdat; 1962. 120 p.

© 2026 The Authors. This is an open access article under the CC BY license (<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>).

The authors declare no conflict of interest.

About the author:

Georgiy M. Dubov, C. Sc. in Engineering, Associate Professor of the Department of Mining Machines and Complexes, T.F. Gorbachev Kuzbass State Technical University (28, Vesennyya St., Kemerovo, 650000, Russian Federation), ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-5383-8884>, e-mail: nikokem@mail.ru

Sergey A. Nokhrin in Engineering, Deputy General Director, TechnoEKO Limited Liability Company (11 Azovskaya St., Prokopyevsk, 653046, Russian Federation), e-mail: nsa500@mail.ru

Daniil M. Yakobson, Post-graduate Student, T.F. Gorbachev Kuzbass State Technical University (28, Vesennyya St., Kemerovo, 650000, Russian Federation), e-mail: daneel3000@gmail.com

Danil A. Boronenkov, Post-graduate Student, T.F. Gorbachev Kuzbass State Technical University (28, Vesennyya St., Kemerovo, 650000, Russian Federation), e-mail: danil.boronenkov@inbox.ru

Contribution of the authors:

Georgiy M. Dubov – scientific management, conceptualization of research and calculations, conclusions.

Sergey A. Nokhrin – calculations, writing the text.

Daniil M. Yakobson – processing of the results.

Danil A. Boronenkov – literature review, data collection and analysis.

Authors have read and approved the final manuscript.

