

УДК 622.23.05

АНАЛИЗ КРИОГЕННЫХ БОРТОВЫХ ТОПЛИВНЫХ СИСТЕМ ОБЕСПЕЧИВАЮЩИХ ДВУХТОПЛИВНЫЙ (ГАЗОДИЗЕЛЬНЫЙ) РЕЖИМ РАБОТЫ КАРЬЕРНЫХ САМОСВАЛОВ

Ельцов И.Е., магистрант гр. КТМ-191, II курс
Нохрин С.А., магистрант гр. КТМ-191, II курс
Научный руководитель: Дубов Г.М., к.т.н., доцент
Кузбасский государственный университет имени Т.Ф. Горбачева
г. Кемерово

Потребность в твердых полезных ископаемых в мире ежегодно возрастает на 0,6 -1,5%. В программе развития угольной промышленности России планируется увеличение добычи угля до 500 млн. т. в год к 2030 г. [1]

В ближайшей перспективе рост промышленного производства неизбежно приведет к увеличению потребления полезных ископаемых. Это, в свою очередь, приведет к значительной потребности в экономичной карьерной технике с повышенными экологическими требованиями, т.к. затраты на транспорт являются одной из основных составляющих в составе полных затрат по добыче и переработке полезных ископаемых. Доля затрат на транспортные работы может составлять более 40%. Эффективность разработки месторождения в значительной мере зависит от применяемого для перевозки горной массы вида транспорта (автомобильного, железнодорожного, конвейерного, гидравлического и др.), выбор которого определяется горно-геологическими условиями месторождений. Основным видом технологического транспорта для открытых горных работ является автомобильный [2-3].

Для транспортировки горной массы используются тяжелые карьерные самосвалы с дизельными двигателями внутреннего сгорания, которые ежегодно потребляют миллиарды литров дизельного топлива, причем 70–80 % общего объема топлива потребляют нагруженные самосвалы на подъемах при относительно малой скорости движения. Это приводит к значительному выбросу в атмосферу вредных (токсичных) веществ. Для снижения объёмов вредных выбросов в атмосферу, при эксплуатации карьерных самосвалов, одним из путей решения данного вопроса является использование альтернативных, более экологичных, видов топлива [4-6].

Принятые международные стратегии по снижению выбросов парниковых газов, уменьшению выбросов оксидов азота и серы будут способствовать поиску альтернативных источников энергии. Одним из видов альтернативных источников энергии является природный газ. По итогам 2018 года потребление газа в качестве моторного топлива в России составило 624 млн. м³. Согласно долгосрочной государственной стратегии развития газомоторного рынка в России к 2030 году планируется увеличить этот показатель почти в 20 раз, т.е. до 11 млрд. м³ [7].

Использование сжиженного природного газа (СПГ) взамен нефтяного моторного топлива на крупных транспортных средствах, в том числе на карьерных самосвалах, позволяет значительно снизить затраты на топливо, а также содержание токсичных и канцерогенных веществ в отработавших газах.

Использование СПГ в качестве моторного топлива на карьерных самосвалах, оснащенных дизельными двигателями, возможно реализовать, как при полном преобразовании дизельных двигателей в газовые двигатели, работающие только на газовом топливе, так и при частичном изменении дизельных двигателей, т.е. оснащение их дополнительной газовой системой питания для двухтопливного режима работы.

Для полного преобразования дизельного двигателя требуется создание нового двигателя, работающего только на газовом топливе. Поэтому двигатели, работающие в двухтопливном режиме, получили наибольшее распространение. В этом режиме двигатель работает как на дизтопливе, так и на газовом топливе, которое имеет более высокую температуру самовозгорания, чем дизельное, поэтому само оно воспламениться не может. В данном случае в начале работы двигателя подается небольшое количество дизтоплива, называемое «запальным топливом», для поджигания газозвушной смеси. В этой связи, двухтопливный двигатель не может работать только на газе [3].

При частичном изменении дизельных двигателей карьерных самосвалов в двухтопливный режим работы преобразования самого двигателя не требуется. Для этого карьерные самосвалы оснащаются криогенными бортовыми топливными системами (КБТС). Их можно разделить на следующие технологические схемы: с криогенным насосом (рис. 1, а); с равновесным состоянием сжиженного природного газа при повышенном давлении (рис. 1, б); с управляющим испарителем криогенного бака (рис. 1, в).

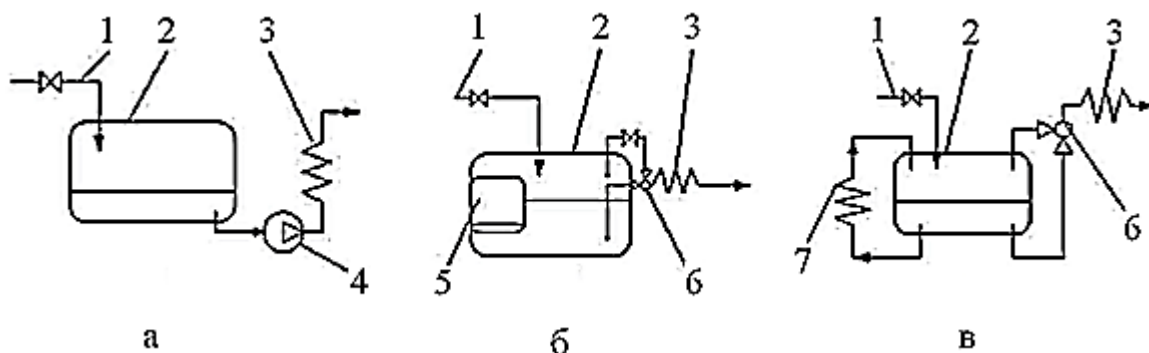


Рисунок 1 – Технологические схемы КБТС:

- 1 – линия подачи СПГ в криогенный бак; 2 – криогенный бак;
 3 – испаритель-регазификатор; 4 – криогенный насос; 5 – дополнительное паровое пространство; 6 – переключатель фаз; 7 – управляющий испаритель.

Первая технологическая схема с криогенным насосом (рис. 1, а) состоит из линии подачи СПГ, криогенного бака, испарителя-регазификатора и криогенного насоса. Эта схема используется в случае, когда необходимо подавать газ в двигатель при повышенном давлении. Использование криогенного насо-

са обеспечивает давление подачи газа более 2,5 МПа. При этом в криогенном баке поддерживается давление около 0,2 МПа, чтобы обеспечить подачу СПГ на насос. Этот уровень давления обеспечивается за счет отбора газа из испарителя-регазификатора, что позволяет отказаться от управляющего испарителя.

Преимуществом данной схемы является то, что криогенный бак заправляется сжиженным природным газом при давлении, близком к атмосферному, что предполагает низкое содержание диоксида углерода в СПГ.

Основные недостатки данной схемы: запуск системы в работу; обеспечение однофазного состояния жидкости в насосе; наличие дорогостоящего криогенного насоса, который должен длительно и непрерывно работать в условиях вибраций.

Вторая технологическая схема (рис. 1, б) с равновесным состоянием сжиженного природного газа при повышенном давлении, состоящая из линии подачи СПГ, криогенного бака, испарителя-регазификатора, переключателя фаз и дополнительного парового пространства. В системе отсутствует управляющий испаритель, и подача газа в двигатель через испаритель-регазификатор осуществляется за счет первоначального давления в баке, создаваемого при его заправке СПГ, находящегося в равновесном состоянии, с достаточно высокой температурой. При опустошении бака происходит снижение давления в нем из-за увеличения парового пространства, а также вскипание газа, и в паровое пространство поступает дополнительное количество пара.

Среди преимуществ можно отметить то, что отсутствие управляющего испарителя и регулятора давления в баке не только уменьшает стоимость оборудования, но и повышает надежность работы системы, так как при эксплуатации исключается вероятность кристаллизации диоксида углерода, а также других примесей и забивки ими испарителя и криогенного вентиля. Это позволяет снизить требования по содержанию диоксида углерода в СПГ.

Однако использование СПГ, находящегося в равновесном состоянии, имеет ряд недостатков, в числе которых следующие: для реализации бездренажной заправки необходимо на станции наполнения иметь СПГ с температурой около 140 К (равновесное давление 0,6 МПа) и давлением не менее 0,8-0,9 МПа и проводить заправку при повышенном давлении в криогенном баке; при высокой начальной температуре газа сокращается длительность бездренажного хранения СПГ в баке; из-за более высокой начальной температуры газа и, соответственно, меньшей плотности количество заправленного СПГ примерно на 10-20 % меньше, чем для схемы с управляющим испарителем.

Третья технологическая схема (рис. 1, в) состоит из линии подачи СПГ, криогенного бака, испарителя-регазификатора, переключателя фаз и управляющего испарителя. Сжиженный природный газ после заправки имеет равновесное давление, близкое к атмосферному. Для подачи газа в двигатель используется управляющий испаритель, который увеличивает давление в баке. Для управления давлением используются регулятор давления и переключатель

тель фаз, через который газ направляется в испаритель-регазификатор при повышенном давлении и далее в двигатель.

Данная технологическая схема имеет следующие преимущества: относительно простое оборудование на заправочной станции; длительное бездренажное хранение СПГ из-за низкого давления в баке в начальный момент; наибольшее количество топлива в объеме.

Недостатки этой технологической схемы: в начале движения автомобиля разрушается слой равновесного СПГ на границе раздела фаз, давление в баке быстро снижается из-за конденсации пара на поверхности СПГ, уменьшается расход газа на двигатель, и он глохнет; из-за низкой температуры СПГ растворимость диоксида углерода в жидком метане мала и возможна кристаллизация CO_2 с забивкой трубопроводов; в процессе испарения возможна кристаллизация диоксида углерода в управляющем испарителе, что может привести к его забивке и прекращению подачи газа в двигатель; при заправке методом перекачки (безнасосная схема) пары жидкости выбрасываются в атмосферу; в случае переполнения бака СПГ выбрасывается через свечу, создавая пожароопасную ситуацию. Эта схема, несмотря на недостатки, является достаточно распространенной и реализуется многими компаниями.

Помимо этого, сегодня обсуждается вопрос об использовании кассетных КБТС, в которых вместо заправки бака сжиженным природным газом производится замена пустого бака на предварительно заполненный на станции производства СПГ. Преимущество такой схемы – сокращение длительности заправки; отсутствие промежуточного резервуара на заправочной станции, за счет этого снижения стоимости станции и заправки.

Недостатком этого способа является то, что с увеличением числа криогенных баков уменьшается эффект от снижения стоимости из-за отсутствия расходного резервуара и повышаются требования к пожаробезопасности.

На сегодняшний день во многих странах активно проводятся работы по переводу внедорожной техники на сжиженный природный газ – тягачей, буксиров, буровых установок, автотехники повышенной грузоподъемности и карьерных самосвалов. Например, в Мексике с 2016 года и в Турции с 2018 года, на золотодобывающих рудниках эксплуатируются первые карьерные самосвалы Caterpillar (грузоподъемностью 130 и 220 тонн), оснащенные криогенными бортовыми топливными системами и работающие в двухтопливном режиме работы [8-10].

В России первую успешную модернизацию тяжёлых карьерных самосвалов БелАЗ для обеспечения их эксплуатации в двухтопливном режиме реализовала группа компаний: ООО «Сибирь-Энерго» и ООО «ТехноЭко». При научном и инженерном сопровождении учёных Кузбасского государственного технического университета имени Т.Ф. Горбачёва, разработан проект по модернизации карьерных самосвалов БелАЗ-75131 (грузоподъемностью 130 тонн) для их работы по газодизельному циклу. Данный технический проект получил одобрение завода изготовителя карьерных самосвалов ОАО «БЕЛАЗ». Было разработано и внедрено несколько модификаций криогенных

бортовых топливных систем для тяжёлых карьерных самосвалов БелАЗ-75131 [11-13].

В результате проведенного в работе анализа было установлено что:

1. Использование сжиженного природного газа, в качестве моторного топлива для карьерной техники имеет большие перспективы. Сжиженный природный газ является альтернативным видом моторного топлива, которое значительно дешевле и экологичнее дизельного топлива. Использование сжиженного природного газа не требует сложной и трудоёмкой конструктивной доработки дизельных двигателей внутреннего сгорания.

2. На карьерных самосвалах частичная конвертация дизельных двигателей посредством установки криогенных бортовых топливных систем представляется на сегодня наиболее перспективным направлением развития газомоторной карьерной техники, чем разработка новых газовых двигателей, работающих только на газовом топливе.

3. В настоящее время существует ряд классических видов технологических схем криогенных бортовых топливных систем, поэтому исследования, направленные на обоснование и выбор конструктивных и схемных решений по размещению и компоновке криогенных бортовых топливных систем именно на карьерной технике во взаимосвязи с горнотехническими, эргономическими и экологическими требованиями, а также последующее изучение их эксплуатационных характеристик, являются актуальными.

Список литературы

1. Dubov, G.M. Substantiation of the need to create an eccentric cycloidal gearing transmission of geokhod / G.M. Dubov, D.S. Trukhmanov, A.A. Chegoshchev, V.E. Ashikhmin. – DOI: 10.1051/e3sconf/20184103008. – Текст: электронный // IIIth International Innovative Mining Symposium. – Kemerovo, Russian Federation, october 03-05, 2018. – E3S Web Conf. 41, 03008 (2018). – p.6. – URL: http://www.e3conferences.org/articles/e3sconf/pdf/2018/16/e3sconf_iims2018_030-08.pdf (дата обращения: 16.03.2021).

2. Dubov, G.M. Development of technical requirements for on-board cryogenic fuel systems of BelAZ dump trucks / G.M. Dubov, D.S. Trukhmanov, S.A. Nokhrin, A.N. Sergel. – DOI: 10.1051/matecconf/201929703002 – Текст: электронный // X International Scientific and Practical Conference «INNOVATIONS IN MECHANICAL ENGINEERING» (ISPCIME 2019). Kemerovo-Sheregesh, Russia, november 2019. – MATEC Web of Conferences 297, 03002 (2019). – p.7. – URL: https://www.matec-conferences.org/articles/matecconf/pdf/2019/46/matecconf_ispcime18_03002.pdf (дата обращения: 17.03.2021).

3. Dubov, G.M. Procedure for haul truck on-board LNG fuel systems performance evaluation / G.M. Dubov, D.S. Trukhmanov, S.A. Nokhrin, A.N. Sergel. – DOI: 10.1051/e3sconf/201910503019. – Текст: электронный // IVth International Innovative Mining Symposium. – Kemerovo, Russian Federation, octo-

ber 14-16, 2019. – E3S Web of Conferences 105, 03019 (2019). – p.8. – URL: https://www.e3s-conferences.org/articles/e3sconf/pdf/2019/31/e3sconf_iims18_03019.pdf (дата обращения: 17.03.2021).

4. Кузнецов, И.В. Энергетическая оценка эксплуатации газодизельных карьерных самосвалов БелАЗ-75131 на разрезах Кузбасса / И.В. Кузнецов, И.А. Паначев, Г.М. Дубов, С.А. Нохрин. – DOI: 10.14489/hb.2019.04.pp.019-023. – Текст: электронный // «Справочник. Инженерный журнал». – Москва: «СПЕКТР», 2019. – №4(265). – С. 19 - 23. URL: <http://handbook-j.ru/index.php/archive-eng/1074-019-023> (дата обращения: 16.03.2021).

5. Kuznetsov, I.V. Energy Assessment of BelAZ-75131 Gas-diesel Mining Dump Trucks Operation at Kuzbass Open Casts / I.V. Kuznetsov, I.A. Panachev, G.M. Dubov, S.A. Nokhrin. – DOI: 10.1051/e3sconf/202017403010 – Текст: электронный // Vth International Innovative Mining Symposium. – Kemerovo, Russian Federation, october 19-21, 2020. – E3S Web of Conferences 174, 03010 (2020). – p.8. – URL: https://www.e3s-conferences.org/articles/e3sconf/abs/2020/34/e3sconf_iims2020_03010/e3sconf_iims2020_03010.html (дата обращения: 18.03.2021).

6. Dubov, G.M. Prospects for the use of liquefied natural gas as a motor fuel for haul trucks / G.M. Dubov, D.S. Trukhmanov, S.A. Nokhrin, A.N. Sergel. – DOI: 10.1051/e3sconf/201910503018 – Текст электронный // IVth International Innovative Mining Symposium. – Kemerovo, Russian Federation, october 14-16, 2019. – E3S Web of Conferences 105, 03018 (2019). – p.7. – URL: https://www.e3s-conferences.org/articles/e3sconf/pdf/2019/31/e3sconf_iims18_03018.pdf (дата обращения: 16.03.2021).

7. Azikhanov, S.S. Development of the instrumentation system for gas-and-diesel fuelled BelAZ dump truck X International Scientific and Practical Conference / S.S. Azikhanov, A.R. Bogomolov, G.M. Dubov, A.N. Sergel. – DOI: 10.1051/matecconf/201929703001 – Текст: электронный // «INNOVATIONS IN MECHANICAL ENGINEERING» (ISPCIME 2019). – Kemerovo-Sheregesh, Russia, november 2019. MATEC Web of Conferences 297, 03001 (2019). – p.6. – URL: https://www.matec-conferences.org/articles/matecconf/pdf/2019/46/matecconf_ispcime18_03001.pdf (дата обращения: 17.03.2021).

8. Попов, О.М. Системы хранения и подачи сжиженного природного газа, установленные на транспортные средства / О.М. Попов, А.В. Брагин, Ю.В. Колгушкин, Н.М. Еремина, С.Б. Мильман, В.Н. Удут. – Текст: непосредственный // «Использование природного газа на железнодорожном транспорте»: Материалы заседания секции «Распределение и использование газа» НТС ОАО «Газпром» (Екатеринбург, декабрь 2006). – Москва: ООО «ИРЦ «Газпром», 2007. – С. 57.

9. Горбачев, С.П. Основные технические требования и результаты испытаний криогенных бортовых топливных систем для транспортных

средств / С.П. Горбачев, В.П. Попов. – Текст: непосредственный // «Современные технологии сжижения природного газа в установках малой и средней производительности. Использование природного газа на железнодорожном транспорте»: Материалы заседания секции «Распределение и использование газа» НТС ОАО «Газпром» (Екатеринбург, декабрь 2006 г.). - Москва: ООО «ИРЦ «Газпром», 2007. - 152 с.

10. Горбачев, С.П. Результаты испытаний опытных образцов криогенных бортовых топливных систем для транспортных средств / С.П. Горбачев, В.П. Попов, А.Д. Шапкайтц, М.В. Люгай, С.Е. Поденок. – Текст: непосредственный // Газовая промышленность. - 2008. - Спецвыпуск 626. - С. 17-20.

11. Dubov, G.M. Method for installing cryogenic fuel tanks on the deck of BelAZ 7513 mining dump truck/ G.M. Dubov, D.S. Trukhmanov, S.A. Nokhrin, A.N. Sergel. – DOI: 10.1051/e3sconf/202017403016 – Текст: электронный // Vth International Innovative Mining Symposium. – Kemerovo, Russian Federation, October 19-21, 2020. – E3S Web of Conferences 174, 03016 (2020). – p.8. – URL: https://www.e3s-conferences.org/articles/e3sconf/abs/2020/34/e3sconf_iims2020_03016/e3sconf_iims2020_03016.html (дата обращения: 18.03.2021).

12. Dubov, G.M. The use of alternative fuel for heavy-duty dump trucks as a way to reduce the anthropogenic impact on the environment / G.M. Dubov, D.S. Trukhmanov, S.A. Nokhrin – DOI: 10.1088/1755-1315/459/4/042059 – Текст: электронный // INTERNATIONAL MULTI-CONFERENCE ON INDUSTRIAL ENGINEERING AND MODERN TECHNOLOGIES (FarEastCon-2019). – IOP Conf. Series: Earth and Environmental Science 459, 042059 (2020). – p.6. – URL: <http://iopscience.iop.org/article/10.1088/1755-1315/459/4/042059> (дата обращения: 18.03.2021).

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.: ил. Текст: непосредственный.