

УДК 622.276:622.684-62

Статья / Article

© ПНИПУ / PNRPU, 2019

ПЕРЕВОД КАРЬЕРНЫХ САМОСВАЛОВ НА ГАЗ В УСЛОВИЯХ СЕВЕРА

М.Л. Хазин

Уральский государственный горный университет (620144, Россия, г. Екатеринбург, ул. Куйбышева, 30)

TRANSFER OF QUARRY DUMPS TO GAS UNDER THE CONDITIONS OF THE NORTH

Mark L. Khazin

Ural State Mining University (30, Kuybyshev st, Ekaterinburg, 620144, Russian Federation)

Получена / Received: 12.10.2018. Принята / Accepted: 14.01.2019. Опубликовано / Published: 29.03.2019

Ключевые слова:

карьерные самосвалы, экология, открытые горные работы, дизельный двигатель, выхлопные газы, дизельное топливо, природный газ.

Улучшению экономической и экологической ситуации при открытых горных работах способствует использование альтернативных видов моторного топлива. Анализ развития открытых горных работ в России свидетельствует о постоянном их смещении на удаленные северные территории. В себестоимости добычи полезного ископаемого доля транспортных работ составляет 40–50 %, и при понижении горных работ на каждые 100 м себестоимость транспортирования горной массы самосвалами возрастает на 20–30 %. С увеличением глубины карьера естественная вентиляция рабочей зоны ухудшается, что приводит к накоплению отработанных газов дизельных двигателей в карьере. Это сказывается на здоровье горнорабочих и на экономике предприятия, так как влечет за собой необходимость остановки карьера. В настоящее время мировое двигателестроение рассматривает использование природного газа как моторного топлива вместо дизельного топлива. Специфика северных районов такова, что топливо надо завозить на год вперед в период навигации, что увеличивает его цену, тогда как газовые месторождения расположены непосредственно в Якутии. Себестоимость производства жидкого природного газа (СПГ) в регионах его потребления в качестве моторного топлива намного ниже, чем расходы на доставку дизельного топлива. Производство может быть организовано непосредственно на месторождениях газа в Западной Якутии. Установки по производству СПГ компактны и высоконадежны. Испытания карьерных самосвалов Cat 789C, Komatsu 830 и 930 в газодизельном режиме показали, что эффективность и производительность газового двигателя были сопоставимы с эффективностью дизельного двигателя. Экономия дизельного топлива составила 80 %, а объем выбросов отработанных газов сократился на 25 %, обеспечивая при этом улучшение экологической ситуации. Перевод карьерных самосвалов на СПГ позволит в 2–3 раза уменьшить загазованность карьеров и шум, повысить эффективность и конкурентоспособность предприятия за счет снижения затрат на приобретение топлива, транспортировку горной массы и экологические штрафы.

Key words:

mining dump trucks, ecology, open-pit mining, diesel engine, exhaust gases, diesel fuel, natural gas.

The use of alternative types of motor fuel contributes to the improvement of the economic and environmental situation in open-pit mining. An analysis of the development of opencast mining in Russia indicates constant shift to the remote northern territories. In the cost of mining, the share of transport works is 40–50%, and as the mining operations go deeper for every 100 m, the cost of transporting the rock mass by tipper trucks increases by 20–30%. With an increase in the depth of the quarry, the natural ventilation of the working area deteriorates, which leads to the accumulation of exhaust gases of diesel engines in the quarry. This affects the health of miners and the economy of the enterprise, as it entails the need to stop the quarry. Currently, the global engine industry is considering the use of natural gas as a motor fuel instead of diesel fuel. The specificity of the northern regions is such that fuel must be delivered a year in advance during the navigation period, which increases its price, while gas fields are located directly in Yakutia. The cost of production of liquid natural gas (LNG) in the regions of its consumption as a motor fuel is much lower than the cost of delivery of diesel fuel. Production can be organized directly at the gas fields in Western Yakutia. LNG plants are compact and highly reliable. Tests of Cat 789C, Komatsu 830 and 930 mining trucks in gas-diesel mode showed that the efficiency and performance of the gas engine were comparable to the efficiency of a diesel engine. Diesel fuel saving was 80%, while exhaust emissions were reduced by 25%, that improve the environmental situation. Converting of tipper trucks to LNG will reduce the gas pollution of quarries and noise by 2-3 times, increase the efficiency and competitiveness of the enterprise by reducing the costs of fuel, transporting rock mass and environmental fines.

Хазин Марк Леонтьевич – доктор технических наук, профессор кафедры эксплуатации горного оборудования (тел.: +007 912 269 81 72, e-mail: Khasin@ursmu.ru).

Mark L. Khazin (Author ID in Scopus 6506526940) – Doctor of Technical Sciences, Professor (tel.: +007 912 269 81 72, e-mail:Khasin@ursmu.ru).

Введение

В составе полных затрат по добыче и переработке полезного ископаемого затраты на транспорт являются одной из основных составляющих. В себестоимости добычи полезного ископаемого доля транспортных работ может составлять 40–50 %. 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. В настоящее время и на ближайшую перспективу основным видом технологического транспорта для открытых горных работ остается автомобильный.

Анализ развития открытых горных работ на рудных месторождениях России показывает их постепенное смещение в удаленные северные районы с увеличением глубины карьеров до 500–600 м. При этом глубина карьеров непрерывно увеличивается, причем при высокой интенсивности наращивания производственной мощности [1]. Практика показывает, что на каждые 100 м понижения горных работ себестоимость транспортирования горной массы самосвалами возрастает на 20–30 %.

Движение карьерных самосвалов на глубоких карьерах (при глубине более 200 м) осуществляется по серпантину на крутых уклонах. Из-за большого угла подъема дорог двигатель самосвала нагружается на полную мощность при малой скорости движения, что приводит к увеличению выбросов токсичных веществ и расхода топлива в 2–3 раза. Увеличение объемов производства также способствует повышению потребления энергии и выбросов выхлопных газов дизельных двигателей самосвалов.

С понижением горизонта условия естественной вентиляции рабочей зоны ухудшаются и выхлопные газы накапливаются в карьере. Такой загрязненный

воздух, поступая в работающий двигатель, приводит к неполному сгоранию топлива и, следовательно, к повышенному расходу моторного топлива, а также дополнительно ухудшает экологическую обстановку, создавая угрозу здоровью работающего персонала и оказывая значительное влияние на производительность работ за счет увеличения перерывов в работе из-за загазованности карьеров [1–8].

Для исключения простоев оборудования и персонала разрабатывались и исследовались многочисленные способы и средства снижения загрязненности воздуха рабочей зоны: искусственное проветривание карьеров (в том числе принудительная вентиляция рабочей площадки карьера с помощью отслуживших ресурс мощных авиационных двигателей), очистка воздуха в застойных зонах путем распыления воды или генерирования снега, применение различных средств и методов снижения выбросов вредных веществ [9–11]. Но все они не обеспечивают эффективного решения проблемы, а экологическая обстановка в карьере продолжает ухудшаться [1, 2, 6–7, 12].

В Сибири и на Крайнем Севере из-за проблем запуска двигателя при низких температурах дизели часто не глушатся в течение всего зимнего периода. В результате вырабатывается ресурс двигателя, имеет место значительный перерасход топлива и, соответственно, увеличение объемов выбросов выхлопных газов. Несмотря на то что российский север характеризуется малой концентрацией автомобильного парка, дизельные транспортные средства производят 95,96 % загрязнения окружающей среды вредными выбросами выхлопных газов. Природа севера весьма чувствительна к такому воздействию.

К многолетней экологической проблеме горных выработок, разрабатываемых открытым способом, прибавилась и высокая стоимость транспортных расходов, определяемая в том числе непрекращающимся ростом цен на моторное топливо. Специфика

северных районов, в том числе и Якутии, такова, что топливо можно завезти только в период навигации, которая длится всего пять месяцев, поэтому топливо вынуждены завозить на год вперед, что дополнительно увеличивает его цену.

Одним из путей улучшения экономической и экологической ситуации при открытых горных работах является использование альтернативных видов моторного топлива. Единственным экономически оправданным альтернативным топливом в настоящее время признан природный газ, который можно применять в качестве моторного топлива без какой-либо переработки, кроме обязательной технологической стадии добычи и транспортировки газа [13–22].

Газомоторное топливо в мире

В настоящее время мировое двигателестроение рассматривает расширение применения природного газа как моторного топлива. В качестве моторного топлива используется сжиженный углеводородный газ (СУГ), сжиженный природный газ (СПГ) и компримированный природный газ (КПГ), который является наиболее дешевым из всех видов моторного топлива (табл. 1).

Таблица 1

Цены на компримированный природный газ в сравнении с другими видами газомоторного топлива [23]

| Страна | Цена, евро/м ³ | Цена КПГ как процент от цены | |
|----------|---------------------------|------------------------------|-------------------|
| | | бензин | дизельное топливо |
| Евросоюз | 0,83 | 58,4 | 60,2 |
| США | 0,46 | 59,0 | 61,0 |
| Китай | 0,43 | 60,0 | 65,0 |
| Россия | 0,27 | 35,0 | 38,0 |

СПГ получают из природного газа после очистки от примесей. Процесс сжижения идет ступенями, на каждой из которых газ сжимается в 5–12 раз, затем охлаждается и передается на следующую ступень. При температуре –161,5 °С газ превращается в жидкость, а его объем уменьшается в 600 раз, что является одним из основных

преимуществ этой технологии. Сжиженный газ перевозится в специальных криогенных емкостях – морских танкерах или цистернах для сухопутного транспорта. Это позволяет доставлять СПГ в районы, которые находятся далеко от магистральных газопроводов, и экспортировать в любые точки мира [17, 19, 21, 22, 24, 25].

СУГ – смесь фракций пропана и бутана, производимая на нефте- и газоперерабатывающих заводах как отдельная товарная позиция. Преимущество сжиженного углеводородного газа в том, что он легко сжимается при обычной температуре и давлении в 10–15 атмосфер, а для его перевозки достаточно стального баллона с толщиной стенок всего 4–5 мм. Для получения компримированного природного газа следует сжать метан до давления 200–250 атмосфер. Поэтому при работе с КПГ необходимы более высокие требования к безопасности. При его транспортировке и хранении требуются значительно более прочные баллоны и резервуары. Вследствие этого на автомобильном, железнодорожном и речном транспорте предпочитают использовать более безопасный пропан.

Для заправки автотранспорта используются два разных вида газовых заправок: для КПГ – это автомобильные газонаполнительные компрессорные станции, для СУГ и СПГ – автомобильные газозаправочные станции. По данным NGVA, сейчас в мире насчитывается 1433 станции СПГ, подавляющая часть которых находится в Китае. США занимают второе место с 46 СПГ-заправочными станциями (табл. 2). Управление энергетической информации США (EIA) прогнозирует начало массового использования газомоторного топлива в стране после 2025 г.

Заправочные станции СПГ не соединяются с газопроводом и не требуют компрессоров, но должны иметь криогенные хранилища. Поэтому строительство таких станций обходится дороже, чем для КПГ [16].

Таблица 2

Газозаправочные станции СПГ в мире [23]

| Страна | Количество станций | Страна | Количество станций |
|----------------|--------------------|--------------|--------------------|
| Китай | 1330 | Швеция | 8 |
| США | 46 | Нидерланды | 7 |
| Европа | 43 | Канада | 2 |
| Великобритания | 13 | Польша | 1 |
| Испания | 12 | Таиланд | 1 |
| Эстония | 12 | Россия | 1 |
| Австралия | 10 | Всего в мире | 1433 |

За последние годы в ряде стран мира была создана система организационных, финансовых и технических мер стимулирования использования газомоторного топлива. Мировой рынок сжиженного природного газа как моторного топлива в настоящее время активно развивается (рис. 1). Увеличение доли природного газа в мировом энергобалансе фиксируется статистически и, более того, прогнозируется специалистами в будущем.



Рис. 1. Показатели мирового рынка газомоторного топлива [26]

Согласно прогнозам развития мировой энергетики (Международное энергетическое агентство (International Energy Agency, IEA), Британская нефтегазовая компания (British Petroleum) и Институт экономики энергетики Японии (Institute of Energy Economics of Japan, IEEJ)), потребление природного газа в ближайшие десятилетия будет расти более быстрыми темпами, чем любого другого вида топлива, особенно его ископаемых

видов. При этом роль СПГ в будущем энергетическом балансе мира возрастет. Так, по прогнозу IEEJ, спрос на СПГ к 2040 г. увеличится более чем в 2 раза (с 239 млн т в 2014 г. до 547 млн т). Аналогичное развитие прогнозирует и British Petroleum: к 2035 г. доля СПГ в потреблении вырастет с 10 % в 2014 г. до 15 % в 2035 г. [22].

Газомоторное топливо в России

Сегодня Россия занимает 20-е место в мире по газификации транспорта, на котором в основном применяется КПГ и СУГ. Число газомоторных автомобилей в России составляет около 150 тысяч, к 2020 г. увеличится более чем в 2 раза и достигнет 370 тысяч единиц.

Почти весь российский рынок газомоторного топлива в виде СУГ приходится на нефтедобывающие компании, включая ПАО «Газпром нефть», а рынок КПГ принадлежит ПАО «Газпром» [13, 15, 18, 20].

Системная работа, включающая формирование нормативной базы, обновление парка автомобилей, строительство сети заправочных станций и хранилищ с достаточно плотным размещением и прочей инфраструктурой, только начинается. На территории России действует более 250 автомобильных газонаполнительных станций, и их число стабильно увеличивается (табл. 3). Строительство новых объектов газомоторной инфраструктуры для КПГ и СПГ, их ввод в эксплуатацию обеспечивает компания «Газпром газомоторное топливо», которой присвоен статус единого оператора по развитию рынка газомоторного топлива от ПАО «Газпром».

Следует учесть, что стоимость строительства заправок пропаном и метаном существенно отличается и в России составляет соответственно около 15 и 85 млн руб.

На сегодняшний день сжиженный природный газ в России наиболее востребован в магистральных грузоперевозках и на железнодорожном транспорте [13, 15, 19, 20]. При постепенном развитии рынка потребление газа к 2020 г. может достичь 10,4 млрд т³.

Таблица 3

Газомоторный транспорт
и газозаправочные станции в России [23]

| Наименование | Кол-во |
|---|--------|
| <i>Газомоторный транспорт</i> | |
| Всего единиц транспорта | 86 012 |
| Процент от газомоторного транспорта в мире | 0,53 |
| Процент от всего транспортного парка в стране | 0,24 |
| <i>Газозаправочные станции</i> | |
| Всего штук | 253 |
| Процент от газозаправочных станций в мире | 1,2 |

Сокращение затрат на моторное топливо при использовании газа возможно за счет более низкой цены на газ по сравнению с продуктами нефтепереработки. Как показал российский опыт, газомоторное топливо является наиболее дешевым видом топлива (табл. 4) [13, 15, 19, 20]. По данным НП «Национальная газомоторная ассоциация», стоимость 1 кубометра газа эквивалентна 1 литру бензина, что дешевле традиционного топлива более чем в 2 раза.

Таблица 4

Средняя розничная цена на сжиженный
углеводородный газ по регионам России
на 16.07.2018 г. [27]

| Регион | Средняя розничная цена СУГ, руб/л (с НДС) | Регион | Средняя розничная цена СУГ, руб/л (с НДС) |
|----------------------|---|-----------------------|---|
| Республика Татарстан | 20,28 | Волгоградская область | 22,76 |
| Ставропольский край | 21,17 | Астраханская область | 22,78 |
| Брянская область | 21,87 | Орловская область | 23,10 |
| Белгородская область | 22,00 | Липецкая область | 23,15 |
| Краснодарский край | 22,00 | Ростовская область | 23,80 |
| Курская область | 22,00 | Республика Адыгея | 24,00 |
| Тамбовская область | 22,47 | Оренбургская область | 24,19 |

Примечание: оптовая цена на сжиженный газ составляет 13,582 руб. за килограмм на 05.06.2018.

Экономия будет тем больше, чем выше стоимость дизельного топлива, т.е. на севере. Например, в Якутии стоимость дизельного

топлива в 1,2–1,3 раза выше, чем в центральных районах России (табл. 5).

В настоящее время Россия взяла курс на внедрение экологичных видов топлива в транспортном комплексе. Прогнозируется, что к 2030 г. природный газ станет ключевым альтернативным видом топлива на пассажирском, грузовом, морском и железнодорожном транспорте, при применении сельскохозяйственной и горной техники.

Таблица 5

Цена дизельного топлива в районах
России на 18.02.18 г

| Регион | Цена дизельного топлива, руб/л | Регион | Цена дизельного топлива, руб/л |
|---------------------------------|--------------------------------|---------------------------|--------------------------------|
| Республика Ингушетия | 30,8 | Республика Бурятия | 41,82 |
| Республика Татарстан | 37,83 | Новосибирская область | 41,84 |
| Ставропольский край | 38 | Иркутская область | 42,62 |
| Смоленская область | 38,46 | Забайкальский край | 42,65 |
| Владимирская область | 39,24 | Республика Тыва | 43,97 |
| Омская область | 40,36 | Москва | 44,19 |
| Алтайский край | 40,53 | Хабаровский край | 44,23 |
| Республика Алтай | 40,60 | Амурская область | 44,27 |
| Ямало-Ненецкий автономный округ | 41,61 | Ненецкий автономный округ | 45,50 |
| Томская область | 41,63 | Республика Саха (Якутия) | 50,64 |
| Республика Хакасия | 42,30 | Камчатский край | 51,04 |

Стимулом для развития рынка газомоторного топлива стало Распоряжение Правительства РФ № 767-р от 13.05.2013 года, в соответствии с которым разработан комплексный план мероприятий по расширению использования природного газа в качестве моторного топлива. Сегодня эти документы являются системообразующими для газомоторной отрасли. Их принятие дало импульс развитию рынка газомоторного топлива на территории большинства субъектов Российской Федерации [29].

Применение СПГ на автотранспорте

При переводе дизельных автомобилей на природный газ используют два режима работы двигателя: газодизельный и газовый. Более широкое практическое применение получило использование газодизельного режима.

В этом случае дизельное топливо не полностью заменяют на сжиженный газ. При частичном дросселировании используется смесь состава – 70 % сжиженного газа и 30 % дизельного топлива, а при полном дросселировании – 25 % сжиженного газа и 75 % дизельного топлива [21, 30–34].

Газодизельный режим целесообразно использовать на самосвалах, находящихся в эксплуатации, поскольку для этого необходимы минимальная доработка топливной системы двигателя и создание бортового запаса газа. После проведенной модернизации самосвал может работать как на дизельном топливе, так и в газодизельном режиме.

Перевод карьерных самосвалов на чисто газовый режим целесообразно производить во время планового капитального ремонта двигателя, а также при установке новых двигателей взамен вышедших из строя. Установка модифицированного газового двигателя на карьерных самосвалах доступна и значительно дешевле, чем покупка нового двигателя той же мощности. При работе карьерного самосвала на чисто газовом режиме расход дизельного топлива отсутствует, поэтому вместо топливного бака для дизельного топлива устанавливают криогенную емкость для бортового запаса СПГ, а головку цилиндров оснащают запальными свечами зажигания [24, 30, 32–34].

Природный газ в качестве моторного топлива имеет следующие преимущества [1, 13, 15, 19, 21, 30–37]:

- стоимость газа значительно ниже эквивалентного по теплотворной способности объема нефтяного моторного топлива;
- перевод машин на природный газ не требует существенной конструктивной

переделки самого двигателя, кроме оснащения двигателя газовой топливной аппаратурой;

- мощность двигателя практически не изменяется;
- увеличивается в 1,5 раза ресурс работы двигателя;
- уменьшается на 20–30 % расход моторного топлива;
- уменьшаются общие транспортные и эксплуатационные расходы;
- уменьшаются расходы на техническое обслуживание;
- снижается в 2–3 раза объем токсичных выбросов в атмосферу (выбросы оксидов азота снижаются в 2,5 раза, оксида углерода – в 10 раз, углеводородов – в 3 раза, полностью исключаются выбросы соединений свинца, серы и сажи);
- снижается на 3–5 дБ (А) шум двигателя;
- температура самовозгорания метана составляет 550 °С, пропан-бутана – 450 °С, а дизельного топлива и бензина – 250–300 °С.

За рубежом отчетливо наметилась тенденция к использованию СПГ на автотранспорте. Сжиженный природный газ используется в городских и междугородних дизельных транспортных средствах Франции, Великобритании, Нидерландов, Германии, Японии, США. Исследования последних лет, выполненные фирмами Ford, MAN, Saviem, Toyo Menka и др., показали техническую возможность и экономическую целесообразность широкого использования СПГ на автотранспорте [21, 24, 25, 36].

В Европе фирма Volvo Trucks представляет грузовые автомобили на газе, соответствующие стандарту Евро-6. Они сравнимы с дизельными грузовиками по производительности и топливной эффективности, но при этом оказывают гораздо меньше вредного воздействия на окружающую среду. Новые грузовые автомобили Volvo FH LNG и Volvo FM LNG снабжены газовыми двигателями, которые работают на сжиженном природном газе по циклу Дизеля. Газовый двигатель Volvo

мощностью 460 л.с. имеет крутящий момент 2300 Н м, а для версии мощностью 420 л.с. крутящий момент составляет 2100 Н м. Такими же характеристиками обладают аналогичные дизельные двигатели Volvo. Более того, расход топлива у этих двигателей сравним с дизельными двигателями Volvo и на 15–25 % меньше, чем у традиционных газовых, а уровень выбросов CO_2 на 20 % меньше по сравнению с дизельным топливом [37].

Во многих странах активно проводятся работы по переводу внедорожной техники – тягачей, буксиров, буровых установок, автотехники повышенной грузоподъемности и карьерных самосвалов – на СПГ. Например, по Китаю ездят 240 000 грузовиков большой грузоподъемности на СПГ, 5000 по США и 1500 – по Европе [25, 36–42].

Карьерный самосвал HOWO производства китайского автозавода Sinotruk работает на сжиженном природном газе. Результаты испытаний показали двукратную экономию на топливе в денежном эквиваленте. Аналогичный дизельный самосвал за смену расходует около 200 литров дизельного топлива, а газовый – примерно 280 литров сжиженного природного газа. Даже при односменном режиме работы экономия в год составляет более миллиона рублей. СПГ позволяет обеспечить большой запас хода на одной заправке с использованием емкостей традиционной формы и размеров, сопоставимых с топливными баками для дизельного топлива. В связи с увеличением использования СПГ в качестве топлива для большегрузных и карьерных самосвалов в Китае (примерно 4,6 млрд кубометров природного газа в 2015 г.) экономия дизельного топлива составила 16 млн т. В результате это привело к сокращению выбросов отработанных газов на 6 млн т эквивалента CO_2 [38, 39, 41, 42]. Фирма SHACMAN представила новый тягач серии F3000 и внедорожный карьерный самосвал на СПГ. По данным SHACMAN, карьерные самосвалы на СПГ экономят около 16 долл.

на каждые 100 км по сравнению с такими же дизельными грузовиками [43].

В России также ведутся работы по созданию и переводу мощных самосвалов на СПГ. На международной промышленной выставке «ИННОПРОМ-2017» (Екатеринбург) был представлен газомоторный карьерный самосвал БелАЗ-75476 грузоподъемностью 45 т. Самосвал оснащен газопоршневым двигателем «Кунгур-550», разработанным уральской компанией «Технология 1604» на базе дизеля ЯМЗ-240. Силовой агрегат имеет газотурбинный наддув и мощность 550 л.с. В качестве топлива используется сжиженный природный газ, запас которого размещен в специальном криобаке на раме с левой стороны (рис. 2).



Рис. 2. Карьерный самосвал БелАЗ-75476 на СПГ

Снаряженная масса и грузоподъемность БелАЗ-75476 остались такими же, как и у дизельного прототипа – БелАЗа-7547. Но газовый самосвал на 10 % мощнее, экономичнее и обеспечивает низкий уровень выбросов вредных веществ, что особенно актуально при работе в глубоких карьерах.

За последние несколько лет на СПГ-топливо переводят также и гигантские карьерные самосвалы с двигателями мощностью 1000–2500 кВт и грузоподъемностью 100–350 т.

Технология по использованию сжиженного природного газа была опробована на карьерных самосвалах Caterpillar. Испытания карьерного самосвала Cat 789C в газодизельном режиме в Морейфилне Квинсленда

(Queensland's Morayfield), США, показали, что эффективность и производительность газового двигателя сопоставимы с эффективностью дизельного двигателя. Экономия дизельного топлива составила 80 %, а объем выбросов отработанных газов сократился на 25 %, обеспечивая при этом улучшение экологической ситуации. По результатам испытаний только за счет уменьшения расходов на топливо возможно экономить 600 000 долл. США в год на самосвал.

Компания GFS Corp. предлагает системы преобразования на СПГ для четырех моделей грузовиков: Caterpillar 777 и 793, а также Komatsu 830 и 930. За десятки тысяч часов пробега самосвалы Caterpillar и Komatsu на горных предприятиях в западной части Соединенных Штатов Америки также показали значительную экономию затрат на топливо [40].

Американская компания Arch Coal, Inc. разместила заказ на GFS Corp (GFS) для перевода карьерных самосвалов Komatsu 930E на газодизельную технологию EVO-MT™ 9300 NG + D Systems™ на руднике Кэмпбелл, штат Вайоминг, США. В рамках данной программы GFS Corp преобразует почти четверть карьерной техники Arch Coal, а именно Komatsu 930E, для эксплуатации на СПГ с использованием технологии EVO-MT 9300 System. В компании работает 148 карьерных самосвалов [40].

Американская компания Chart Industries запустила пилотный СПГ-проект в сотрудничестве с канадской компанией Teck Resources. Как передает информресурс LNG World News, в рамках проекта планируется использовать сжиженный газ в качестве моторного топлива для шести сверхтяжелых карьерных самосвалов с мощнейшими дизельными двигателями, работающих в канадской провинции Британская Колумбия. Сжиженный газ поставляет компания Fortis BC.

В 20 регионах России реализуются пилотные проекты по переводу транспорта на компримированный природный газ, а в

трех субъектах началась активная работа в инновационном направлении – внедрение на транспорте сжиженного природного газа. Подобная дифференциация рынка газомоторного топлива обусловлена прежде всего особенностями использования природного газа на различных видах техники.

В Кузбассе шесть горнодобывающих компаний подписали соглашение о намерениях использования СПГ. В рамках проекта планируется к 2030 г. перевести 2500 самосвалов БелАЗ-75139 с двигателями Cummins KTA 50C на газомоторное топливо (СПГ). Ожидается, что перевод на сжиженный газ позволит сократить затраты на топливную составляющую в себестоимости угля на 30–40 % и значительно уменьшить негативное воздействие на окружающую среду.

АК «АЛРОСА» с 2015 г. активно внедряет систему перевода техники на газовое топливо. Ежегодно на ГСМ (бензин, дизельное топливо) компания расходует 2 млрд руб. Основная доля затрат приходится на закупку, доставку и хранение дизельного топлива для карьерных самосвалов. В 2018 г. значительно увеличится число рейсов автопоездов из Верхне-Мунского месторождения алмазов на фабрику №12 Удачинского горно-обогатительного комбината. Увеличится объем работы горнодобывающей и обслуживающей техники на промышленном участке Верхней Муны, следовательно, вырастет потребность в ГСМ. В условиях Мирнинского района метан используется в сжатом, т.е. компримированном, виде. Природный газ присутствует на этой территории, его отличают низкая стоимость и экологическая безопасность. В этом году за счет использования ГСМ в качестве моторного топлива ожидается экономия до 100 млн руб.

Затраты на переоборудование карьерных самосвалов, находящихся в эксплуатации, на газодизельный режим с использованием СПГ складываются из стоимости топливной системы с электронным регулированием, криогенного топливного бака и расходов на

их монтаж. Общая сумма затрат на переоборудование одного карьерного самосвала БелАЗ-75485 в серийном варианте ориентировочно составит 10,0–12,0 тыс. долл.

При переводе карьерных самосвалов на чисто газовый режим затраты на переоборудование самосвала с учетом установки свечей зажигания, оснащения двигателя аппаратурой высокого напряжения и электронной системой зажигания составят около 15,0 тыс. дол. [30, 34, 36].

Например, на карьерный самосвал БелАЗ-75485 грузоподъемностью 42 т, имеющий средний расход дизельного топлива 320 л в смену, при переводе на газодизельный режим следует установить криогенный бак емкостью 560 л и массой 130 кг. СПГ хранится под давлением 4–10 бар при температуре от –125 до –140 °С. При коэффициенте использования емкости криогенного бака 0,9 количество природного газа после газификации СПГ составит 300 м³. При этом максимальное давление газа в криогенном топливном баке не будет превышать 0,6 МПа, и для снижения давления газа перед его подачей в топливную систему двигателя осуществляют одноступенчатое редуцирование. Бак объемом 560–680 л вмещает количество СПГ, достаточного на 800–1000 км пути, а заправка газом занимает примерно столько же времени, что и соизмеримых баков для дизельного топлива [21, 24, 30, 34, 36].

Срок окупаемости затрат на переоборудование карьерного самосвала с дизельного топлива на использование СПГ составит 1,0–1,5 года [30, 34, 40]. С учетом увеличения ресурса работы двигателя в 1,5 раза и снижения расхода моторного масла на 30–40 % экономический эффект будет значительно больше, а срок окупаемости затрат на переоборудование карьерного самосвала с дизельного режима на газодизельный режим – меньше.

Северный вариант

Себестоимость производства жидкого природного газа в северных районах в качестве моторного топлива намного ниже,

чем расходы на доставку дизельного топлива железнодорожным транспортом из регионов, расположенных на расстояниях 2000 км и более. Кроме того, важнейшее конкурентное преимущество природного газа перед дизельным и бензиновым видами топлива состоит в его устойчивости к воздействию низких температур, позволяющей использовать его на всех видах транспорта в арктических и северных территориях.

Источниками газомоторного топлива могут стать отдельные малые месторождения газа, не включенные в систему региональной газораспределительной сети, а также месторождения, находящиеся на завершающей стадии эксплуатации непосредственно в Западной Якутии [44].

Природный газ, добываемый на месторождениях Западной Якутии, в основном состоит из метана, количество которого колеблется в широких пределах (табл. 6). Производство СПГ может быть организовано непосредственно на месторождении газа. Установки по его производству компактны, хорошо адаптируются к полевым условиям и высоконадежны. В этом случае транспортировка сжиженного природного газа до горнодобывающего предприятия, где используется техника, работающая на газовом топливе, становится экономически выгоднее, чем транспортировка нефтяного топлива. Связано это с тем, что для производства нефтяного топлива цикл производства включает транспортировку от месторождения до нефтеперерабатывающего завода, переработку нефти и изготовление топлива, транспортировку готового топлива до потребителя. Для природного газа нет необходимости в дополнительной переработке. К настоящему моменту в различных областях и регионах России построены и введены в эксплуатацию несколько малотоннажных комплексов производства сжиженного природного газа [45].

Летом, при положительных температурах воздуха, потребление газового топлива увеличивается на 3 %, а зимой, при

отрицательных температурах, увеличивается потребление дизельного топлива по сравнению с природным газом на 9 %. Когда температура окружающей среды падает до -38°C , адаптируемость транспортного средства по расходу топлива при работе в газодизельном режиме увеличивается на 6–18 % по сравнению с дизельным режимом.

Таблица 6
Состав газа некоторых месторождений
Западной Якутии

| Месторождение | Состав газа, % | | | |
|--------------------|------------------------|--------------------------------|---|----------------------|
| | Метан CH_4 | Этан C_2H_6 | Пропан C_3H_8 и более тяжелые | Азот N_2 |
| Верхневиллючанское | 84,50 | 7,50 | 0,55 | 7,45 |
| Иреляхское | 87,71 | 2,45 | 2,82 | 7,02 |
| Мирнинское | 82,40 | 9,60 | 6,80 | 1,20 |
| Отрадинское | 83,15 | 4,16 | 3,19 | 9,50 |
| Среднеботуобинское | 87,18 | 3,66 | 2,97 | 6,19 |
| Средневиллюйское | 90,60 | 4,90 | 3,70 | 0,80 |
| Усть-Виллюйское | 92,50 | 2,80 | 3,30 | 1,40 |
| Хатаго-Мурбайское | 90,77 | 4,78 | 3,13 | 1,32 |
| Чаяндинское | 85,48 | 4,57 | 3,51 | 6,44 |

Снижение температуры воздуха уменьшает объемы выбросов сажи и оксида азота в выхлопных газах двигателя как при дизельном, так и при газодизельном режимах. При этом содержание сажи снижается до 26 %, а оксида азота – до 54 %. Но независимо от температуры окружающей среды величина выбросов вредных веществ, выделяемых выхлопными газами, на единицу потребленного топлива для автомобилей при работе в газодизельном режиме на 14–33 % меньше, чем на дизельном топливе [46–47].

Следовательно, на территории Западной Якутии имеются все необходимые условия и технический задел для обеспечения производства и жилищно-бытового сектора электроэнергией и теплом, а также моторным топливом парков карьерных машин и оборудования, железнодорожного транспорта и объектов малой энергетики за счет использования сжиженного природного газа [44].

Несмотря на то что преимущества СПГ как моторного топлива для дизельных

двигателей, а именно значительное улучшение экологической ситуации в области технического обслуживания и экономии на дизельном топливе, очевидны и признаны специалистами, практическая реализация преобразования тяжелого промышленного транспортного оборудования на СПГ идет крайне медленно.

Объем СПГ в сравнении с эквивалентным дизельным топливом больше, чем объем дизельного топлива. Кроме того, газовое топливо является более горючим. Даже малые утечки топлива могут привести к серьезным последствиям. Электрооборудование самосвалов даже не проверялось на возможность взрыва в случае утечек и накопления газа в местах, где возможно появление искры от работающего двигателя. Также существует риск загрязнения окружающего воздуха в карьере продуктами, которые тяжелее воздуха (бутан, пропан, этан, пентан и т.д.), они, хотя и в небольших количествах, всегда присутствуют в природном газе и имеют тенденцию накапливаться на нижних горизонтах в карьере. Глубокая очистка газа от этих фракций может решить проблему, но повышает стоимость топлива.

Использование газового топлива в карьерах требует решения многих проблем и может быть возможным при надежно проверенном оборудовании, установленном сервисе с квалифицированным персоналом и рекомендациями по технике безопасности. В частности, разогрев двигателя открытым пламенем перед запуском двигателя должен быть запрещен. Должна быть неподвижная система теплой воды или теплого воздуха, которая хуже работает. Сварка, резка огнем, пайкой и другими работами открытого пламени также должны быть запрещены на открытых карьерах. Все эти дополнительные меры предосторожности делают использование газовых транспортных средств более дорогостоящим, поэтому даже испытания могут проводиться только после полной оценки мер безопасности.

Производство СПГ в России находится на начальном этапе развития. Все крупнотоннажные проекты в России – «Газпром» (Сахалин, Владивосток, Балтийский), «Новатэк» (Ямал), нефтяная компания «Роснефть» (Дальневосточный), Группа «АЛЛТЕК» и нефтяная компания «Роснефть» (Печора) – осуществляются с участием иностранных компаний, в руках которых остаются ключевые элементы проектов – технологии. Отсутствие в России собственных крупнотоннажных технологий сжижения, методик расчета основного криогенного оборудования ставит российские проекты в зависимость от зарубежных поставщиков технологий, оборудования и сервисных услуг.

В целях снижения этой зависимости и повышения технологического уровня производства СПГ в России «Газпром ВНИИГАЗ» проводит разработку отечественной технологии сжижения природного газа «Gazprom MR» по новому холодильному циклу. По данной разработке ОАО «Газпром» подал международную заявку на изобретение «Способ сжижения природного газа и установка для его осуществления» [22].

Последние годы развитие рынка сжиженного природного газа происходит более активно, постоянно увеличивается спрос на данный вид топлива, что приводит к строительству новых заводов по его производству.

У российских компаний есть планы по строительству заводов СПГ на Ямале, северо-западе России, во Владивостоке, но единственным реальным СПГ-проектом является «Ямал-СПГ» мощностью 16,5 млн т. Его акционерами являются «Новатэк» (50,1 %), французская Total (20%), китайские CNPC (20 %) и Фонд шелкового пути (9,9 %).

Выводы

Природный газ является перспективным моторным топливом для автомобильной техники, в том числе и горнодобывающей (самосвалы, бульдозеры, экскаваторы,

дробилки и т.д.). Поэтому предприятия этой отрасли начинают переводить свой автопарк на газомоторное топливо, в том числе развивать инфраструктуру по обслуживанию этой техники.

Сдерживающими факторами для широкого применения газового топлива в Российской Федерации является неразвитая сеть заправочных станций, которые построены, как правило, вблизи газопроводов. Горнодобывающие предприятия расположены в районах, где газовая сеть отсутствует либо мало развита. Однако к настоящему времени разработаны компактные и высоконадежные компрессорные установки для сжижения природного газа непосредственно на месторождении.

Перевод карьерных самосвалов на СПГ позволит полностью исключить соединения свинца, в 8–10 раз снизить дымность отработанных газов дизельных двигателей, в 2–3 раза уменьшить загазованность атмосферы карьеров и шум, повысить эффективность и конкурентоспособность предприятия за счет снижения затрат на приобретение топлива, транспортировку горной массы и экологические штрафы.

Кроме того, переход на СПГ позволит гарантированно обеспечить топливом удаленные субъекты Российской Федерации, сократить объемы резервирования нефтепродуктов в весенне-летний период («северный завоз») и снизить расходы федерального бюджета.

Таким образом, использование СПГ как газомоторного топлива для горно-технологического оборудования на карьерах севера на сегодняшний день имеет большие перспективы.

Библиографический список

1. Кузнецов Д.В., Одаев Д.Г., Линьков Я.Е. Особенности выбора технологического автотранспорта для разработки глубоких карьеров Севера // Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал). – 2017. – № 5. – С. 54–65.

2. Шешко О.Е. Эколого-экономическое обоснование возможности снижения нагрузки на природную среду от карьерного транспорта // Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал). – 2017. – № 2. – С. 241–252.
3. Greenhouse gas and ammonia emissions from current technology heavy-duty vehicles / A. Thiruvengadam, M. Besch, D. Carder, A. Oshinuga // Journal of the Air & Waste Management Association. – 2016. – Vol. 66, № 11. – P. 1045–1060. DOI: 10.1080/10962247.2016.1158751
4. Workplace exposure to diesel and gasoline engine exhausts and the risk of colorectal cancer in Canadian men / L. Kachuri, P.J. Villeneuve, M-É. Parent, K.C. Johnson // Environmental Health. – 2016. – Vol. 15, № 1. – P. 4–16. DOI: 10.1186/s12940-016-0088-1
5. Taxell P., Santonen T. Diesel engine exhaust: basis for occupational exposure limit value // Toxicological Sciences. – 2017. – Vol. 158, № 2. – P. 243–251. DOI:10.1093/toxsci/kfx110
6. Хазин М.Л., Тарасов А.П. Эколого-экономическая оценка карьерных троллейбусов // Вестник Пермского национального исследовательского университета. Геология. Нефтегазовое и горное дело. – 2018. – Т. 17, № 2. – С. 66–80. DOI: 10.15593/2224-9923/2018.2.6
7. Сокращение загазованности карьерного пространства при применении новых видов карьерного транспорта / П.И. Тарасов, А.Г. Журавлев, Е.В. Фелелов [и др.] // Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал). – 2008. – № 2. – С. 260–271.
8. 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. 47–65. DOI: 10.1080/17480930.2013.772699
9. Морин А.С. Трубопроводная вентиляция на карьерах // Горная промышленность. – 2002. – № 3. – С. 40–43.
10. Старостин И.И., Бондаренко А.В. Проветривание карьеров струйными вентиляторами в комплексе с устройством для аэрации // Наука и образование: научное издание МГТУ им. Н.Э. Баумана. – 2015. – № 1. – С. 32–41. DOI: 10.7463/0115.0755210
11. Козырев С.А., Амосов П.В. Пути нормализации атмосферы глубоких карьеров // Вестник Мурманского государственного технического университета. – 2014. – Т. 17, № 2. – С. 231–237.
12. Klanfar M., Korman T., Kujundžić T. Potrošnja goriva i koeficijenti opterećenja pogonskih motora mehanizacije pri eksploataciji tehničko-građevnog kamena // Tehnički vjesnik. – 2016. – Vol. 23, № 1. – P. 163–169. DOI: 10.17559/TV-20141027115647
13. Аكوпова Г.С., Власенко Н.Л., Тетеревлев Р.В. Перспективы замены дизельного топлива природным газом на транспорте // Вести газовой науки. – 2013. – № 2 (13). – С. 56–62.
14. Бойченко С.В., Шкильнюк И.А. Экологические аспекты использования моторных топлив (обзор) // Энерготехнологии и ресурсосбережение. – 2014. – № 5–6. – С. 35–44.
15. Грязнов М.Б. Применение газомоторного топлива в Российской Федерации: проблемы и перспективы // Вестник финансового университета. – 2013. – № 4. – С. 21–31.
16. Виноградова О.В. Газомоторное топливо в мире: состояние и перспективы // Нефтегазовая вертикаль. – 2013. – № 20. – С. 32–35.
17. Litzke W.L., Wegrzyn J. Natural gas as a future fuel for heavy-duty vehicles // SAE Technical Paper. – 2001. – № 2001-01-2067. DOI: 10.4271/2001-01-2067
18. Марков В.А., Бебенин Е.В., Гладышев С.П. Сравнительный анализ альтернативных моторных топлив для дизелей // Известия вузов. Машиностроение. – 2014. – № 5. – С. 43–48. DOI: 10.18698/0536-1044-2014-5-43-48
19. Марков В.А., Поздняков Е.Ф. Природный газ как наиболее выгодное моторное топливо // Автомобильная промышленность. – 2017. – № 1. – С. 11–15.

20. Николайчук Л.А., Дьяконова В.Д. Современное состояние и перспективы развития рынка газомоторного топлива в России // *Науковедение*. – 2016. – Т. 8, № 2 (33). DOI: 10.17122/ogbus-2014-1-377-396
21. Osorio-Tejada J., Llera E., Scarpellini S. LNG: an alternative fuel for road freight transport in Europe // *WIT Transactions on The Built Environment*. – 2015. – Vol. 168. – P. 235–246. DOI: 10.2495/SD150211
22. Цвигун И.В., Ершова Е.В. Мировой рынок сжиженного природного газа: современная конъюнктура и тенденции развития // *Известия Байкальского государственного университета*. – 2016. – Т. 26, № 6. – С. 868–881. DOI: 10.17150/2500-2759.2016.26(6).868-881
23. Виноградова О.В. Газомоторное топливо в мире: состояние и перспективы // *Нефтегазовая вертикаль*. – 2013. – № 20. – С. 32–35.
24. Transport and distribution of liquefied natural gas / B.S. Vasilevich, R. Petrović, M. Miljević, I. Derdemez // *Donnish Journal of Media and Communication Studies*. – 2016. – Vol. 2(1), № 2. – P. 001–006.
25. Mohammad M., Ehsani M. An investigation of natural gas as a substitute for diesel in heavy duty trucks and associated considerations [Электронный ресурс]. – URL: <https://arxiv.org/abs/1512.01421> (дата обращения: 15.09.2018).
26. Итоги Международной конференции «Повышение топливной экономичности и сокращение выбросов от автомобильного транспорта в России» [Электронный ресурс]. – URL: <http://www.slideshare.net/fullscreen/undprussia/development-of-the-globa> (дата обращения: 15.09.2018).
27. Средняя розничная цена на СУГ на АГЗС/МАЗС [Электронный ресурс]. – URL: <http://www.gazpromlpg.ru/?id=415> (дата обращения: 15.09.2018).
28. Цены на бензин в Алтайском крае перестали расти [Электронный ресурс]. – URL: <https://www.katun24.ru/news/356694/> (дата обращения: 15.09.2018).
29. О расширении использования природного газа в качестве моторного топлива: Распоряжение Правительства РФ № 767-р от 13.05.2013 года [Электронный ресурс]. – URL: https://ru.wikisource.org/wiki/Распоряжение_Правительства_РФ_от_13.05.2013_№_767-р (дата обращения: 15.09.2018).
30. Герасимов В., Передельский В., Дарбинян В. Перевод карьерных самосвалов с использованием бортовых топливных систем сжиженного природного газа // *НМ-оборудование*. – 2005. – № 1. – С. 29–33.
31. 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
32. 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
33. Research article modeling of a spray of diesel fuel with dissolved liquefied natural gas / H.A.A. Wahhab, M.A. Ismael, A. Aziz, M.R. Heikal // *Asian Journal of Applied Sciences*. – 2017. – № 10 (2). – P. 88–95. DOI: 10.3923/ajaps.2017.88.95
34. Герасимов В.Е., Дарбинян Р.В. Использование на борту сжиженного природного газа топливных систем для открытых карьеров // *Химическое и нефтегазовое машиностроение*. – 2005. – № 8. – С. 21–23.
35. Greenhouse gas emissions from heavy-duty natural gas, hybrid, and conventional diesel on-road trucks during freight transport / D.C. Quiros, J. Smith, A. Thiruvengadam, T. Huai // *Atmospheric Environment*. – 2017. – Vol. 168. – P. 36–45. DOI: org/10.1016/j.atmosenv.2017.08.066
36. 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. – P. 785–795.
DOI: org/10.1016/j.rser.2016.12.104

37. Грузовики Volvo, знакомимся [Электронный ресурс]. – URL: <https://dalnobo1.org/blog/2017/10/03/gruzoviki-volvo-fh-lng-i-volvo-fm-lng-znakomimsya> (дата обращения: 12.03.2018).

38. The characteristics of greenhouse gas emissions from heavy-duty trucks in the Beijing-Tianjin-Hebei (BTH) region in China / Y. Xing, H. Song, M. Yu [et al.] // *Atmosphere*. – 2016. – Vol. 7, № 9. – P. 121–132. DOI: 10.3390/atmos7090121

39. Energy consumption and greenhouse gas emissions of diesel/LNG heavy-duty vehicle fleets in China based on a bottom-up model analysis / H. Song, X. Ou, J. Yuan, C.L. Wang // *Energy*. – 2017. – Vol. 140. – P. 966–978. DOI: org/10.1016/j.energy.2017.09.011

40. Blomerus P., Oulette P. LNG as a fuel for demanding high horsepower engine applications: technology and approaches. – Studija. Vancouver: Westport Innovations Inc., 2013.

41. The evaluation on liquefied natural gas truck promotion in Shenzhen freight / M. Hu, W. Huang, J. Cai, J. Chen // *Advances in Mechanical Engineering*. – 2017. – Vol. 9, № 6. – P. 1687814017705065. DOI: org/10.1177/1687814017705065

42. Li J., Wu B., Mao G. Research on the performance and emission characteristics of the LNG-diesel marine engine // *Journal of Natural Gas Science and Engineering*. – 2015. – Vol. 27. – P. 945–954. DOI: org/10.1016/j.jngse.2015.09.036

43. Компания Shacman представляет новый тягач и самосвал [Электронный ресурс]. – URL: <http://7305555.ru/company/news/shacman-predstavit-noviy-tyagach-i-samosval-spg.html> (дата обращения: 12.03.2018).

44. Тарасов П.И., Хазин М.Л., Фурзиков В.В. Природный газ – перспективное моторное топливо карьерного автотранспорта для районов Севера // *Горная промышленность*. – 2016. – № 6. – С. 51–61.

45. Карякин Е. Мини-СПГ в России: планы и реальность // *Газ России*. – 2015. – № 1. – С. 16–17.

46. 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, № 6. – P. 1006–1017. DOI: 10.2495/SDP-V12-N6-1006-1017

47. Temperature and driving cycle significantly affect carbonaceous gas and particle matter emissions from diesel trucks / M.D. Hays, W. Preston, B.J. George [et. al.] // *Energy & Fuels*. – 2017. – Vol. 31, № 10. – P. 11034–11042. DOI: 10.1021/acs.energyfuels.7b01446

References

1. Kuznetsov D.V., Odaev D.G., Linkov Ia.E. Osobnosti vybora tekhnologicheskogo avtotransporta dlia razrabotki glubokikh karerov Severa [Peculiarities of technological motor transport selection used for deep north open pits operation]. *Gornyi informatsionno-analiticheskii biulleten (nauchno-tekhnicheskii zhurnal)*, 2017, no.5, pp.54-65.

2. Sheshko O.E. Ekologo-ekonomicheskoe obosnovanie vozmozhnosti snizheniia nagruzki na prirodnuuiu sredu ot karemnogo transporta [Ecological and economic substantiation of the possibility to reduce the load on the nature environment from open pit transport]. *Gornyi informatsionno-analiticheskii biulleten (nauchno-tekhnicheskii zhurnal)*, 2017, no.2, pp.241-252.

3. Thiruvengadam A., Besch M., Carder D., Oshinuga A. Greenhouse gas and ammonia emissions from current technology heavy-duty vehicles. *Journal of the Air & Waste Management Association*, 2016, vol.66, no.11, pp.1045-1060. DOI: 10.1080/10962247.2016.1158751

4. Kachuri L., Villeneuve P.J., Parent M-É., Johnson K.C. Workplace exposure to diesel and gasoline engine exhausts and the risk of colorectal cancer in Canadian men. *Environmental Health*, 2016, vol.15, no.1, pp.4-16. DOI: 10.1186/s12940-016-0088-1

5. Taxell P., Santonen T. Diesel engine exhaust: basis for occupational exposure limit

value. *Toxicological Sciences*, 2017, vol.158, no.2, pp.243-251. DOI:10.1093/toxsci/kfx110

6. Khazin M.L., Tarasov A.P. Ecological and economic evaluation of quarry trolley trucks. *Perm Journal of Petroleum and Mining Engineering*, 2018, vol.17, no.2, pp.66-80. DOI: 10.15593/2224-9923/2018.2.6

7. Tarasov P.I., Zhuravlev A.G., Fefelov E.V. et al. Sokrashchenie zagazovannosti karernogo prostranstva pri primenenii novykh vidov karernogo transporta [Reduction of the gas content of the career space when using new types of career transport]. *Gornyi informatsionno-analiticheskii biulleten (nauchno-tekhnicheskii zhurnal)*, 2008, no.2, pp.260-271.

8. 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, no.1, pp.47-65. DOI: 10.1080/17480930.2013.772699

9. Morin A.S. Truboprovodnaia ventilatsiia na karerakh [Pipeline ventilation at the quarry]. *Gornaya promyshlennost*, 2002, no.3, pp.40-43.

10. Starostin I.I., Bondarenko A.V. Provetrivanie karerov struinymi ventilatorami v komplekse s ustroistvom dlia aeratsii [Jet fans airing quarries in combination with a device for aerating]. *Nauka i obrazovanie: nauchnoe izdanie MGTU im. N.E. Baumana*, 2015, no.1, pp.32-41. DOI: 10.7463/0115.0755210

11. Kozyrev S.A., Amosov P.V. Puti normalizatsii atmosfery glubokikh karerov [Ways of atmosphere normalization of deep open-pits]. *Vestnik Murmanskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta*, 2014, vol.17, no.2, pp.231-237.

12. Klanfar M., Korman T., Kujundžić T. Potrošnja goriva i koeficijenti opterećenja pogonskih motora mehanizacije pri eksploataciji tehničko-građevnog kamena. *Tehnički vjesnik*, 2016, vol.23, no.1, pp.163-169. DOI: 10.17559/TV-20141027115647

13. Akopova G.S., Vlasenko N.L., Teterlev R.V. Perspektivy zameny dizelnogo topliva prirodnym gazom na

transporte [Prospects for the replacement of diesel fuel with natural gas in transport]. *Vesti gazovoi nauki*, 2013, no.2 (13), pp.56-62.

14. Boichenko S.V., Shkilniuk I.A. Ekologicheskie aspekty ispolzovaniia motornykh topliv (obzor) [Environmental aspects of the use of motor fuels (review)]. *Energotekhnologii i resursosberezhenie*, 2014, no.5-6, pp.35-44.

15. Griaznov M.B. Primenenie gazomotornogo topliva v Rossiiskoi Federatsii: problemy i perspektivy [Use of natural-gas-based motor fuel in russia: problems and prospects]. *Vestnik finansovogo universiteta*, 2013, no.4, pp.21-31.

16. Vinogradova O.V. Gazomotornoe toplivo v mire: sostoianie i perspektivy [Gas engine fuel in the world: state and prospects]. *Neftegazovaia vertikal*, 2013, no.20, pp.32-35.

17. Litzke W.L., Wegrzyn J. Natural gas as a future fuel for heavy-duty vehicles. *SAE Technical Paper*, 2001, no.2001-01-2067. DOI: 10.4271/2001-01-2067

18. Markov V.A., Bebenin E.V., Gladyshev S.P. Sravnitelnyi analiz alternativnykh motornykh topliv dlia dizelei [Comparative analysis of alternative motor fuels for diesel engines]. *Izvestiia vuzov. Mashinostroenie*, 2014, no.5, pp.43-48. DOI: 10.18698/0536-1044-2014-5-43-48

19. Markov V.A., Pozdniakov E.F. Prirodnyi gaz kak naibolee vygodnoe motornoe toplivo [Using natural gas as motor fuel]. *Avtomobilnaia promyshlennost*, 2017, no.1, pp.11-15.

20. Nikolaichuk L.A., Diakonova V.D. Sovremennoe sostoianie i perspektivy razvitiia rynka gazomotornogo topliva v Rossii [Current state, prospects and problems of development of the gas motor fuel market in Russia]. *Naukovedenie*, 2016, vol.8, no.2(33). DOI: 10.17122/ogbus-2014-1-377-396

21. Osorio-Tejada J., Llera E., Scarpellini S. LNG: an alternative fuel for road freight transport in Europe. *WIT Transactions on The Built Environment*, 2015, vol. 168, pp.235-246. DOI: 10.2495/SD150211

22. Tsvigun I.V., Ershova E.V. Mirovoi rynek szhizhennogo prirodnogo gaza: sovremen-

naia koniunktura i tendentsii razvitiia [Global LNG market: current situation and development trends]. *Izvestiia Baikalskogo gosudarstvennogo universiteta*, 2016, vol.26, no.6, pp.868-881. DOI: 10.17150/2500-2759.2016.26(6).868-881

23. Vinogradova O.V. Gazomotornoe toplivo v mire: sostoianie i perspektivy [Gas engine fuel in the world: state and prospects]. *Neftegazovaia vertikal*, 2013, no.20, pp.32-35.

24. Vasilevich B.S., Petrović R., Miljević M., Derdemez I. Transport and distribution of liquefied natural gas. *Donnish Journal of Media and Communication Studies*, 2016, vol.2(1), no.2, pp.001-006.

25. Mohammad M., Ehsani M. An investigation of natural gas as a substitute for diesel in heavy duty trucks and associated considerations, available at: <https://arxiv.org/abs/1512.01421> (accessed 15 September 2018).

26. Itogi Mezhdunarodnoi konferentsii «Povyshenie toplivnoi ekonomichnosti i sokrashchenie vybrosov ot avtomobilnogo transporta v Rossii» [Results of the International Conference “Increasing fuel efficiency and reducing emissions from road transport in Russia”], available at: <http://www.slideshare.net/fullscreen/undprussia/development-of-the-globa> (accessed 15 September 2018).

27. Sredniaia roznicnaia tsena na SUG na AGZS/MAZS [Average retail price for LHG on AGRS/MFFS], available at: <http://www.gazprom-lpg.ru/?id=415> (accessed 15 September 2018).

28. Tseny na benzin v Altaiskom krae perestali rasti [Gasoline prices have stopped growing in the Altai Territory], available at: <https://www.katun24.ru/news/356694/> (accessed 15 September 2018).

29. O rasshirenii ispolzovaniia prirodnogo gaza v kachestve motornogo topliva: rasporyazhenie pravitelstva RF no. 767-r ot 13.05.2013 goda [Expanding the use of natural gas as a motor fuel: Order of the Government of the Russian Federation No. 767-p dated May 13, 2013], available at: https://ru.wikisource.org/wiki/Распоряжение_Правительства_РФ_от_13.05.2013_№_767-p (accessed 15 September 2018).

30. Gerasimov V., Peredelskii V., Darbinian V. Perevod karernykh samosvalov s ispolzovaniem bortovykh toplivnykh sistem szhizhennogo prirodnogo gaza [Transfer of mining dump trucks using on-board fuel systems of natural gas]. *NM-oborudovanie*, 2005, no.1, pp.29-33.

31. 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, no.2, pp.022010. DOI: 10.1088/1755-1315/87/2/022010

32. 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, pp.52-57. DOI: 10.1016/j.energy.2013.02.027

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

34. Gerasimov V.E., Darbinian R.V. Ispolzovanie na bortu szhizhennogo prirodnogo gaza toplivnykh sistem dlia otkrytykh karerov [Use of onboard liquefied natural gas fuel systems for open-pit dump trucks]. *Khimicheskoe i neftegazovoe mashinostroenie*, 2005, no.8, pp.21-23.

35. 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, pp.36-45. DOI: org/10.1016/j.atmosenv.2017.08.066

36. 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

37. Gruzoviki Volvo znakomimsia, available at: <https://dalnobo.org/blog/2017/10/03/gruzoviki-volvo-fh-lng-i-volvo-fm-lng-znakomimsya> (accessed 12 March 2018).

38. Xing Y., Song H., Yu M. et al. The characteristics of greenhouse gas emissions from heavy-duty trucks in the Beijing-Tianjin-Hebei (BTH) region in China. *Atmosphere*, 2016, vol.7, no.9, pp.121-132. DOI: 10.3390/atmos7090121.
39. Song H., Ou X., Yuan J. Wang C.L. Energy consumption and greenhouse gas emissions of diesel/LNG heavy-duty vehicle fleets in China based on a bottom-up model analysis. *Energy*, 2017, vol.140, pp.966-978. DOI: org/10.1016/j.energy.2017.09.011
40. Blomerus P., Oulette P. LNG as a fuel for demanding high horsepower engine applications: technology and approaches. *Studija*. Vancouver: Westport Innovations Inc., 2013.
41. Hu M., Huang W., Cai J., Chen J. The evaluation on liquefied natural gas truck promotion in Shenzhen freight. *Advances in Mechanical Engineering*, 2017, vol.9, no.6, pp.1687814017705065. DOI: org/10.1177/1687814017705065
42. Li J., Wu B., Mao G. Research on the performance and emission characteristics of the LNG-diesel marine engine. *Journal of Natural Gas Science and Engineering*, 2015, vol.27, pp.945-954. DOI: org/10.1016/j.jngse.2015.09.036
43. Kompaniia Shacman predstavliaet novyi tiagach i samosval, available at: <http://7305555.ru/company/news/shacman-predstavit-noviy-tyagach-i-samosval-spg.html> (accessed 12 March 2018).
44. Tarasov P.I., Khazin M.L., Furzikov V.V. Prirodnyi gaz – perspektivnoe motornoe toplivo karernogo avtotransporta dlia raionov severa [Natural Gas is a promising engine fuel for mining vehicles in the North]. *Gornaiia promyshlennost*, 2016, no.6, pp.51-61.
45. Kariakin E. Mini-SPG v Rossii: plany i realnost [Mini-LNG in Russia: Plans and Reality]. *Gaz Rossii*, 2015, no.1, pp.16-17.
46. 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, pp.1006-1017. DOI: 10.2495/SDP-V12-N6-1006-1017
47. Hays M.D., Preston W., George B.J. et al. Temperature and driving cycle significantly affect carbonaceous gas and particle matter emissions from diesel trucks. *Energy & Fuels*, 2017, vol.31, no.10, pp.11034-11042. DOI: 10.1021/acs.energyfuels.7b01446

Просьба ссылаться на эту статью в русскоязычных источниках следующим образом:

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

Please cite this article in English as:

Khazin M.L. Transfer of quarry dumps to gas under the conditions of the north. *Perm Journal of Petroleum and Mining Engineering*, 2019, vol.19, no.1, pp.56-72. DOI: 10.15593/2224-9923/2019.1.5