



УДК 622.276+622.684:621.452.3

Обзор / Review

© ПНИПУ / PNRPU, 2019

ПРИМЕНЕНИЕ ГАЗОТУРБИННЫХ ДВИГАТЕЛЕЙ ДЛЯ КАРЬЕРНЫХ САМОСВАЛОВ В УСЛОВИЯХ СЕВЕРА

М.Л. Хазин, П.И. Тарасов¹, В.В. Фурзиков²

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

¹ООО «Перспектива-М» (620144, Россия, г. Екатеринбург, ул. Хохрякова, 87)

²Уральский дизель-моторный завод (620137, Россия, г. Екатеринбург, ул. Фронтových бригад, 18)

APPLICATION OF GAS-TURBINE ENGINES FOR MINING DUMPS IN THE CONDITIONS OF THE NORTH

Mark L. Khazin, Petr I. Tarasov¹, Vitaliy V. Furzikov²

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

¹Perspektiva-M LLC (87 Khokhryakova st., Ekaterinburg, 620144, Russian Federation)

²Ural diesel engine plant (18 Frontovye brigades st., Ekaterinburg, 620137, Russian Federation)

Получена / Received: 27.04.2019. Принята / Accepted: 01.08.2019. Опубликовано / Published: 27.09.2019

Ключевые слова:

карьерные самосвалы, экология, открытые горные работы, дизельный двигатель, газотурбинный двигатель, экологическая и экономическая эффективность.

Устойчивая тенденция роста глубины карьеров и соответствующего увеличения плеча откатки в мировой практике открытой разработки месторождений определили главное направление развития карьерных самосвалов – повышение их грузоподъемности, что приводит к увеличению мощности энергосилового агрегата, массогабаритных показателей двигателя, количества потребляемого топлива. В зимний период подготовка дизельного двигателя со специальной системой подогрева при температуре воздуха -40°C к пуску составляет 40–50 мин. Из-за проблем запуска двигателя при низких температурах дизели часто не глушатся в течение всего зимнего периода, вследствие чего вырабатывается ресурс двигателя, происходит значительный перерасход топлива и увеличение объемов выбросов выхлопных газов.

Основными преимуществами газотурбинных двигателей являются высокая экономичность при нагрузках, близких к номинальной, большие агрегатные мощности при малых массе и габаритах (энергоёмкость составляет 1000–3000 кВт/м³, 1000–2000 кВт/т), высокая маневренность и готовность к действию (приготовление к действию – 10–15 мин, время запуска – 120–180 с), приспособленность к автоматизации, высокая надежность, высокая относительная простота конструкции и обслуживания, высокая технологичность, возможность агрегатного ремонта, легкий и надежный пуск при низких температурах и более низкая токсичность выхлопных газов. Удельная масса газотурбинного двигателя значительно меньше и не превышает 25–30 % массы поршневого двигателя, что позволяет облегчить моторную раму и повысить грузоподъемность самосвала. Габаритная мощность газотурбинного двигателя также выше, чем у поршневого, поэтому для первого характерен 2–3-кратный запас по габаритам пространства в моторном отсеке самосвала. Кроме того, газотурбинный двигатель позволяет длительно работать в условиях высокой запыленности воздуха, использовать более дешевое газовое топливо и практически исключить расход масла.

Малая масса и компактные размеры, возможность получения большой мощности в одном агрегате и дистанционного управления, наряду с его легким и надежным пуском при низких температурах, делают газотурбинные двигатели весьма привлекательными для использования на большегрузных карьерных самосвалах, автопоездах с активными прицепами и полуприцепами, особенно в северных и арктических районах.

Key words:

mining trucks; ecology; open cast mining; diesel engine, gas turbine engine, environmental and economic efficiency.

A steady growth trend in open pit depths and a corresponding increase in shoulder haulage in world practice of open pit mining have determined the main direction of the development of mining dump trucks - increasing their carrying capacity, which leads to an increase in the power of the power unit, overall dimensions of the engine, and the amount of fuel consumed. In winter, the preparation of a diesel engine with a special heating system at an air temperature of -40°C for start-up is 40–50 minutes. Due to the problems of starting the engine at low temperatures, diesel engines are often not jammed during the entire winter period, as a result of which the engine resource is generated, there is a significant excessive consumption of fuel and an increase in exhaust emissions.

The main advantages of gas turbine engines are high efficiency at loads close to nominal, large aggregate power with low weight and dimensions (energy consumption is 1000–3000 kW / m³, 1000–2000 kW / t), high maneuverability and readiness for action (preparation for action - 10-15 minutes, start-up time - 120-180 s), adaptability to automation, high reliability, relative simplicity of design and maintenance, high manufacturability, the possibility of aggregate repair, easy and reliable start-up at low temperatures and lower exhaust emissions. The specific gravity of the gas turbine engine is much less and does not exceed 25-30% of the mass of the piston engine, which makes it possible to lighten the motor frame and increase the load capacity of the dump truck. The overall power of a gas turbine engine is also higher than that of a reciprocating one, therefore the former is characterized by a 2-3-fold margin in terms of the space in the engine compartment of the dump truck. In addition, the gas turbine engine allows you to work for a long time in conditions of high dust, use cheaper gas fuel and virtually eliminate oil.

Small weight and compact dimensions, the possibility of obtaining high power in one unit and remote control, along with its easy and reliable starting at low temperatures, make gas turbine engines very attractive for use on heavy-duty mining dump trucks, road trains with active trailers and semi-trailers, especially in northern and arctic areas.

Хазин Марк Леонтьевич – доктор технических наук, профессор кафедры эксплуатации горного оборудования (тел.: +007 3432 83 09 57, e-mail: Khasin@ursmu.ru). Контактное лицо для переписки.

Тарасов Петр Иванович – кандидат технических наук, заместитель директора по научной работе (тел.: +007 3432 83 09 57, e-mail: petr.tarasov95@mail.ru).

Фурзиков Виталий Витальевич – заместитель начальника департамента разработки нового семейства дизелей по экспериментальным работам (тел.: +007 912 252 26 88, e-mail: furzikovvv@mail.ru).

Mark L. Khazin (Author ID in Scopus: 6506526940) – Doctor of Engineering, Professor of the Department of Mining Equipment Operation (tel: +007 3432 83 09 57, e-mail: Khasin@ursmu.ru). The contact person for correspondence.

Petr I. Tarasov (Author ID in Scopus: 57206662431) – PhD in Engineering, Deputy Director for Research (tel.: +007 3432 83 09 57, e-mail: petr.tarasov95@mail.ru).

Vitaliy V. Furzikov – Deputy Head of the Department for the Development of a New Diesel Family for Experimental Work (tel: + 007 912 252 26 88, e-mail: furzikovvv@mail.ru).

Введение

Устойчивая тенденция роста глубины карьеров и соответствующего увеличения плеча откатки в мировой практике открытой разработки месторождений определили главное направление развития карьерных самосвалов – повышение их грузоподъемности, сдерживаемое в настоящее время мощностью двигателя и возможностями применяемых шин. За период 1950–2015 гг. грузоподъемность карьерных самосвалов увеличилась почти в 14 раз [1]. В настоящее время выпускаются карьерные самосвалы Caterpillar 797F (2009) и Liebherr T 284 (2012) грузоподъемностью 363 т, Komatsu 980E-4 (2016) и XCMG XDE400 (2015) грузоподъемностью 400 т, БелАЗ-75710 (2013) грузоподъемностью 450 т (это самый большой в мире грузовик). Дальнейший рост грузоподъемности карьерных самосвалов приводит к увеличению мощности энергосилового агрегата, массогабаритных показателей двигателя и, соответственно, объема моторного отсека.

Мощность двигателей силовых агрегатов современных карьерных самосвалов БелАЗ, Liebherr, Terex, Caterpillar, Komatsu, Hitachi, Sany, XCMG в основном не превышает 2000 кВт при грузоподъемности не более 250 т. Для карьерных самосвалов грузоподъемностью более 250 т применяются либо два двигателя, либо двигатели с увеличенными габаритами (с числом цилиндров 18, 20). При этом отношение мощности двигателя к грузоподъемности самосвала уменьшается от 10 до 7,5 кВт/т. Аналогично уменьшается энерговооруженность (отношение мощности двигателя к массе груженого самосвала) с 6,9 до 3,7 кВт/т, а удельная материалоемкость (отношение массы порожнего самосвала к мощности двигателя) повышается от 54,4 до 122,0 кг/кВт. С увеличением мощности двигателя возрастают объемы потребляемого топлива и выбросов вредных веществ в атмосферу. Увеличение объемов производства также способствует повышению потребления энергии и выбросов выхлопных газов.

Анализ развития открытых горных работ месторождений России показывает их постепенное смещение в удаленные северные районы с увеличением глубины карьеров до 500–600 м. Из практики известно, что на каждые 100 м понижения горных работ себестоимость транспортирования самосвалами горной массы возрастает на 20–30 %, а экологическая обстановка в карьере ухудшается [2, 3–6].

Движение карьерных самосвалов при глубине карьеров 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 увеличивает объем выбросов токсичных веществ и расход топлива в 2–3 раза.

С понижением горизонта условия естественной вентиляции рабочей зоны ухудшаются, из-за чего в карьере накапливаются отработанные газы. Этот загрязненный воздух, поступая в работающий двигатель, приводит к неполному сгоранию топлива и, следовательно, к повышенному расходу моторного топлива и объему выбросов выхлопных газов. Это дополнительно ухудшает экологическую обстановку, создает угрозу здоровью работающего персонала и оказывает значительное влияние на производительность работ за счет увеличения перерывов в работе из-за загазованности карьеров [3, 7–10].

В последнее время к двигателям транспортных средств предъявляются более жесткие требования по снижению уровня токсичности выхлопных газов. Основными нормируемыми токсичными компонентами выхлопных газов двигателей являются оксиды углерода, азота и углеводороды. Их содержание, в свою очередь, определяется количеством кислорода, находящегося в камере сгорания двигателя при горении, т.е. коэффициентом избытка воздуха, а также рядом других факторов.

Цель работы – анализ возможности применения газотурбинных двигателей для карьерных самосвалов в условиях севера.

К многолетней экологической проблеме горных выработок, разрабатываемых открытым способом, прибавилась и высокая стоимость транспортных расходов вследствие непрекращающегося роста цен на моторное топливо. Дефицит жидкого нефтяного моторного топлива, а также высокое загрязнение воздуха продуктами его сгорания вызвали необходимость поиска альтернативных топлив. 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.

По прогнозам, в ближайшей перспективе основным моторным топливом станет природный газ [11–14]. В настоящее время мировое двигателестроение рассматривает возможности расширения применения природного газа. При-

родный газ в качестве моторного топлива используется в виде сжиженного углеводородного газа, сжиженного природного газа и компримированного природного газа. Преимущество использования газомоторного топлива заключается в низком уровне вредных выбросов в атмосферу и относительно низких затратах на его производство.

Методология проведения исследований

Еще в 1969 г. БелАЗ создал 120-тонный газотурбинный грузовик БелАЗ-549В с турбиной мощностью 1200 л. с. (производство Ярославля), а в 1970 г. Госкомитет по науке и технике утвердил план внедрения газотурбинных двигателей: к нему были подключены ГАЗ, МАЗ, МоАЗ, БелАЗ и КрАЗ. В Горьком было создано семейство газотурбинных двигателей ГАЗ-99 мощностью до 250 л. с. В 1973 г. был построен первый газотурбинный МАЗ, а затем появился КрАЗ-260. ГАЗ довел мощность агрегата до 350 л. с. Турбине требовался громоздкий понижающий редуктор: вал вращался со скоростью 35 тыс. об/мин, чего не выдержала бы ни одна трансмиссия. Поскольку подходящих коробки передач и сцепления в СССР не было, их купили в Венгрии. Полученный двигатель весил вдвое меньше, нежели привычный дизельный двигатель для большегрузных автомобилей, выпускаемый Ярославским моторным заводом, выхлоп был чище в 3–6 раз, расход топлива на номинальных режимах на целых 20 % ниже, чем у дизеля. Известно, что машина прошла 2500 км, при этом больше всего проблем было с венгерской трансмиссией: как указано в книге по истории завода, «она не выдерживала никакой критики». В 1976 г. был построен второй экземпляр: агрегат удалось сделать более компактным. В то же время мощность была увеличена еще на 10 л. с., а расход топлива в установившемся режиме был совсем скромным – в 1,4 раза меньше, нежели у дизеля. Но на переходных режимах (разгон – торможение) расход топлива был огромный. К этой проблеме добавились и другие вполне закономерные: динамика оставляла желать лучшего, трансмиссия постоянно ломалась. Несмотря на многие достоинства газотурбинного двигателя, единственный недостаток, расход топлива, сводил на нет все преимущества. На этом эксперименты завершились.

За прошедшие 50 лет в двигателестроении появились новые материалы и технологии. В наши

дни газо-турбинные двигатели широко используются в авиации [15], судостроении [16–18], в газо- и нефтеперекачивающих установках [19, 20], их пробуют применять на железнодорожном транспорте [21, 22]. В последнее время вновь возрос интерес к использованию газотурбинных двигателей для силовых установок наземного автотранспорта [23–26]. Об этом свидетельствуют работы ООО «Курганмашзавод» (перспективная боевая машина пехоты «Рыцарь»), ООО «КамАЗ» (платформа легкой серии), а также продолжающаяся в Самарском ОАО «Кузнецов» и ФГУП «НПЦ газотурбостроения “Салют”» доводка двигателей для газотурбовозов [27, 28].

Автомобильные газотурбинные двигатели предназначены для карьерных самосвалов и автопоездов, т.е. машин большой единичной мощности. Грузоподъемность таких машин достигает 100–450 т при мощности двигателя 750–3500 кВт.

Для сравнения были проанализированы показатели современных поршневых двигателей для карьерных самосвалов, выпускаемых Ярославским моторным заводом, Cummins, MTU, DEUTZ, Detroit Diesel, и газотурбинных двигателей, выпускаемых фирмой «Объединенная двигателестроительная корпорация». Сравнение проводили на основе оценки следующих показателей: g_e – удельный расход топлива (г/кВт·ч), принят на основе данных каталогов,

$$M_{уд} = \frac{M_{дв}}{N_e},$$

$$N_r = \frac{N_e}{V_{дв}},$$

где $M_{уд}$ – удельная масса двигателя, кг/кВт; $M_{дв}$ – масса сухого (незаправленного) двигателя, кг; N_e – номинальная мощность двигателя, кВт; N_r – габаритная мощность двигателя, кВт/м³; $V_{дв}$ – объем двигателя в подкапотном пространстве, м³, определяемый как произведение его габаритных размеров, м, длины, ширины и высоты.

Результаты работы

В нашей стране накоплен богатый научно-практический опыт изучения газотурбинных двигателей. Существующие материалы, например [25, 27–36], и проведенный сравнительный анализ поршневых и газотурбинных двигателей аналогичной мощности автомобильного назначения (рисунок) позволяют отметить следующие технические и эксплуатационные преимущества газотурбинных двигателей:

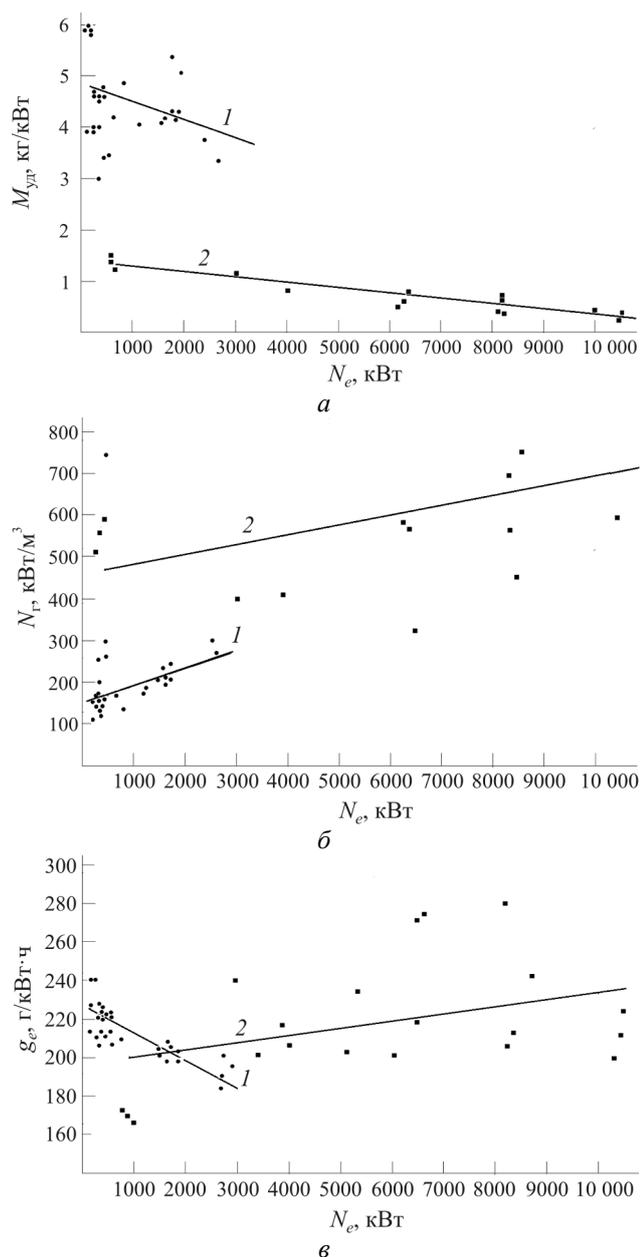


Рис. Зависимости удельной массы двигателя от его мощности (а); габаритной мощности двигателя (б); удельного расхода топлива двигателя (в); 1 – поршневый; 2 – газотурбинный

1. Удельная масса газотурбинного двигателя значительно меньше и не превышает 25–30 % массы поршневого двигателя (см. рис., а), что дает возможность облегчить моторную раму и повысить грузоподъемность самосвала.

2. ГТД обладает более высокой удельной мощностью (отношение мощности двигателя к его массе).

3. Габаритная мощность ГТД также выше, чем у поршневого двигателя (см. рис., б). Например, если для поршневого двигателя мощностью 2000 кВт можно получить примерно 200 кВт с

1 м³ двигателя, то для ГТД этот показатель будет почти в 2,5 раза выше – примерно 500 кВт/м³. Следовательно, для ГТД характерен 2–3-кратный запас по габаритам пространства в моторном отсеке самосвала.

4. Благоприятное изменение крутящего момента двигателя в зависимости от частоты вращения вала двигателя (крутящий момент возрастает при уменьшении частоты вращения).

5. Возможность использования более дешевого газового топлива и практическое отсутствие расхода масла.

6. Значительно меньшее количество деталей двигателя (в основном пар трения скольжения и меньшая нагрузка на подшипники, что увеличивает межремонтный пробег) [25–27, 31–33, 35].

7. Низкая токсичность выхлопных газов. В связи со спецификой принципа работы ГТД (расход воздуха двигателем в 3–4 раза больше, чем у дизеля равной мощности) его отработавшие газы обладают значительно меньшей токсичностью (табл. 1) [28, 36–39].

8. Облегчен запуск в условиях низких температур окружающего воздуха. На территориях Сибири и Крайнего Севера из-за проблем запуска двигателя при низких температурах дизели часто не глушатся в течение всего зимнего периода. Вследствие этого вырабатывается ресурс двигателя, происходит значительный перерасход топлива и наблюдается увеличение объемов выбросов выхлопных газов. Время подготовки транспортного поршневого дизельного двигателя со специальной системой подогрева при температуре воздуха -40 °С к пуску составляет 40–50 мин. Необходим разогрев двигателя перед пуском для уменьшения трения в опорах коленчатого вала, в паре поршень – гильза, а также подогрев масла для уменьшения его вязкости, тогда как для транспортного ГТД при температуре окружающего воздуха -40 °С время подготовки двигателя к пуску составляет 3–5 мин вследствие отсутствия ударных и знакопеременных нагрузок в опорах и применения маловязкого масла [27, 36, 37, 40].

9. Малая трудоемкость и стоимость технического обслуживания. Объем технического обслуживания ГТД существенно меньше, чем дизеля, вследствие отсутствия системы жидкостного охлаждения, регламентных регулировок системы топливоподачи и смены масла. Особенно различие в объемах обслуживания проявляется в зимних (северных) условиях, когда исключается необходимость в системе подогрева. По различным оценкам, включая опыт эксплуатации на

Таблица 1
Показатели токсичности выхлопных газов двигателей

Двигатель	Токсичный компонент, г/кВт ч			
	NO _x	CO	CH	сажа
Дизельный Cummins (TierII)	6,0	3,5	1,1	0,3
ГТД ГАЗ	1,2	0,73	0,16	0,01
ГТД-1250	1,2	0,73	0,14	0,01

ГАЗе [28, 36, 41], трудоемкость и стоимость технического обслуживания ГТД составляет 50 % в сравнении с дизелем при одновременном увеличении коэффициента использования автомобильного парка от 5 до 15 %. Кроме этого, при равенстве мощностей дизеля и ГТД производительность автомобиля увеличивается за счет лучшей тяговой характеристики (в случае трансмиссии с механической коробкой передач) или более высокого КПД трансмиссии.

10. Возможность использования более простой, надежной и дешевой трансмиссии.

11. Практическое отсутствие вибраций и крутильных колебаний.

12. Возможность длительно работать в условиях высокой запыленности воздуха, достигающей на входе в воздухоочиститель силовой установки примерно 2,0–2,5 г/м³, а иногда и выше, что особенно важно для карьерных самосвалов.

По сравнению с эквивалентным поршневым двигателем ГДД работают плавно и тихо, они могут функционировать на различных типах углеводородного топлива, им присуща простота механической конструкции, что оборачивается повышенной надежностью и увеличением срока службы.

При установке на транспортные средства большой грузоподъемности с дизельной силовой установкой гидротрансформаторов возникают дополнительные потери, выражающиеся в увеличении расхода топлива на 10–16 % в режиме трансформации и 4–6 % в режиме блокировки. Кроме того, в дизельных установках имеются большие потери мощности на привод вентилятора системы охлаждения (10–12 %) [24, 35–37, 41].

В то же время уровень удельного расхода топлива у ГТД несколько выше, чем у поршневого, и с ростом мощности двигателей увеличивается. Это связано с более низким КПД газотурбинных двигателей (см. рис., в).

Высокая экономичность дизеля общеизвестна, но это утверждение не является абсолютным и

зависит от условий эксплуатации самосвала. Например, при понижении температуры окружающей среды (зимний период или в северных районах) экономичность ГТД значительно увеличивается. При уменьшении температуры с +20 до –20 °С минимальный удельный расход топлива ГТД ГАЗ-902 уменьшается более чем на 10 %, тогда как расход топлива дизеля, наоборот, увеличивается на 8–10 % [31, 34, 36, 40].

Удельный расход топлива дизельного двигателя карьерного самосвала в среднем составляет 182–212 г/кВт ч. Например, в условиях Удачинского горно-обогатительного комбината АК «АЛРОСА» удельный расход топлива дизельного двигателя карьерного самосвала Cat-785B при номинальной нагрузке составляет 209 г/кВт ч [42]. Современные образцы ГТД автомобилей и судов имеют удельный расход топлива 200–270 кг/кВт ч [28, 35, 43], что сравнимо с показателями дизельного двигателя.

Как показали проведенные исследования [25], современные ГТД можно использовать для мощной внедорожной техники, в том числе карьерных самосвалов. Так, например, в продажу уже поступил серийный промышленный карьерный самосвал БелАЗ грузоподъемностью 90 т. В качестве силовой установки используется газотурбинный двигатель ГТД-1250 мощностью 1250 л. с. (920 кВт), выпускаемый ПАО «Калужский двигатель» [44]. Двигатель имеет массу 1050 кг, удельный расход топлива 225 г/л (табл. 2) и значительно более низкий уровень выброса токсичных веществ.

Преимуществами использования ГТД-1250 являются:

- максимальный КПД привода благодаря высокой приспособляемости ГТД и использование механической трансмиссии без гидротрансформатора;

- рекордно низкие в своем классе масса и габариты силового привода насоса;

- возможность работать в режиме ГРП на высшей передаче с максимальной производительностью благодаря эластичному газовому приводу силовой турбины, без риска разрушения трансмиссии (обеспечена работа меньшим количеством УН2250 по сравнению с дизельными установками);

- возможность длительно передавать момент на остановленный вал насоса при опрессовке;

- отсутствие внешнего пускового устройства; запуск без предпускового подогрева встроенным электростартером за 60 с при температуре –40 °С;

Таблица 2

Сравнение двигателей ГТД-1250 с дизельным двигателем равной мощности [45]

Характеристика	Дизельный Двигатель мощностью 2250 л. с.	Два двигателя ГТД-1250, суммарная мощность 2250 л. с.
Масса без обвязки системами, кг	6155	2100 (2×1050)
Удельная мощность, кВт/кг	0,298	0,875
Коэффициент приспособляемости (M_{\max} при n_{\min}/M при n соответствует P_{\max})	1,3	2,5
Количество передач в агрегируемой трансмиссии	8	4
Емкость жидкостной охлаждающей системы двигателя, л	830–850	0
Емкость масляной системы двигателя, л	210–240	90 (2×45)
Расход масла двигателя, кг/ч	2	0,02
Внешний привод для запуска	Гидравлический	Не требуется
Мощность внешнего привода гидростартера и вентилятора радиаторов, л. с.	160	0
Емкость масляной системы стартера, л	100	0
Тип воздушных фильтров	Контактные (сменные)	Циклонные
Показатели токсичности отработанных газов NO_x /CO/сажа, г/кВт ч	3,5/3,5/0,1 (TIER4)	1,2/0,73/0,01
Устройства и системы зимнего запуска	Webasto 30 кВт, впрыск эфира	Не требуются

Примечание: M_{\max} – максимальный крутящий момент двигателя, M – крутящий момент двигателя при частоте вращения коленчатого вала n , соответствующей максимальной мощности P_{\max} , n_{\min} – минимальная частота вращения коленчатого вала.

– меньший износ деталей ГТД за счет отсутствия пар трения и фактическое отсутствие расхода масла «на угар»;

– экологическая чистота отработанных газов ГТД, их использование в зимнее время для эффективного подогрева моторно-трансмиссионного отсека, плунжерного насоса и его систем (10–15 мин подогрева для выдачи полной мощности);

– простейшее трехточечное крепление двигателей без использования амортизаторов за счет идеальной сбалансированности ГТД и отсутствия вибрации;

– минимальное количество внешних подключений; возможность замены ГТД в полевых условиях в течение 4 ч;

– отсутствие громоздкой жидкостной системы охлаждения и значительной потери мощности на привод ее вентилятора, меньшие затраты на охлаждение маслосистемы.

Газотурбинный двигатель ГТД-1250 предназначен для использования в качестве маршевого двигателя для наземных большегрузных транспортных средств на гусеничном и колесном ходу.

Выводы

Малая масса и компактные размеры, возможность получения большой мощности в одном агрегате и дистанционного управления наряду с его легким и надежным пуском при низких температурах делают газотурбинный двигатель весьма привлекательным для использования на большегрузных карьерных самосвалах, автопоездах с активными прицепами и полуприцепами, особенно в северных и арктических районах.

Библиографический список

1. Анистратов К.Ю. Мировые тенденции развития структуры парка карьерной техники // Горная промышленность. – 2011. – № 6. – С. 22–26.
2. Кузнецов Д.В., Одаев Д.Г., Линьков Я.Е. Особенности выбора технологического автотранспорта для разработки глубоких карьеров севера // Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2017. – № 5. – С. 54–65.
3. Шешко О.Е. Эколого-экономическое обоснование возможности снижения нагрузки на природную среду от карьерного транспорта // Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2017. – № 2. – С. 241–252.
4. Burmistrov K.V., Osintsev N.A., Shakhshakpaev A.N. Selection of open-pit dump trucks during quarry reconstruction // Procedia Engineering. – 2017. – Vol. 206. – P. 1696–1702. DOI: org/10.1016/j.proeng.2017.10.700
5. Хазин М.Л., Тарасов А.П. Эколого-экономическая оценка карьерных троллейбусов // Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. Геология.

Нефтегазовое и горное дело. – 2018. – Т. 17, № 2. – С. 66–80. DOI: 10.15593/2224-9923/2018.2.6

6. A Method of effective quarry water purifying using artificial filtering arrays / M. Tyulenev, E. Garina, A. Khoreshok, O. Litvin, Y. Litvin, E. Maliukhina // IOP Conference Series: Earth and Environmental Science. – IOP Publishing. – 2017. – Vol. 50, № 1. – P. 012035. DOI: 10.1088/1755-1315/50/1/012035

7. Feng Y., Dong Z., Yang J. Performance modeling and cost-benefit analysis of hybrid electric mining trucks // Mechatronic and Embedded Systems and Applications (MESA). 12th IEEE/ASME International Conference. – 2016. – P. 1–6. DOI: 10.1109/MESA.2016.7587102

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. 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

10. Jacobs W., Hodkiewicz M.R., Bräunl T. A cost-benefit analysis of electric loaders to reduce diesel emissions in underground hard rock mines // IEEE Transactions on industry applications. – 2015. – Vol. 51, № 3. – P. 2565–2573. DOI: 10.1109/IAS.2014.6978456

11. Грязнов М.Б. Применение газомоторного топлива в Российской Федерации: проблемы и перспективы // Вестник финансового университета. – 2013. – № 4. – С. 21–31.

12. Марков В.А., Поздняков Е.Ф. Природный газ как наиболее выгодное моторное топливо // Автомобильная промышленность. – 2017. – № 1. – С. 11–15.

13. Тарасов П.И., Хазин М.Л., Фурзиков В.В. Природный газ – перспективное моторное топливо карьерного автотранспорта для районов Севера // Горная промышленность. – 2016. – № 6. – С. 51–52.

14. 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

15. Daidzic N.E., Piancastelli L., Cattini A. Diesel engines for light-to-medium helicopters and airplanes // International Journal of Aviation, Aeronautics, and Aerospace. – 2014. – Vol. 1, № 3. – P. 2–18. DOI: org/10.15394/ijaaa.2014.1023

16. Рыбалко В.В. Газотурбинный реверсивный двигатель в корабельной энергетической установке // Газотурбинные технологии. – 2017. – № 6 (149). – С. 20–22.

17. Gîrba I.A., Pruiu A., Ali B. Considerations on the use of maintenance programs for naval propulsion plants with gas turbines // Mircea cel Batran. Scientific Bulletin Naval Academy. – 2014. – Vol. 17, №. 1. – P. 43.

18. Sahu M.K., Choudhary T., Sanjay Y. Thermoeconomic investigation of different gas turbine cycle configurations for marine application // SAE Technical Paper. – 2016. – № 2016-01-2228. DOI: org/10.4271/2016-01-2228

19. Брычева А.Ю., Моляков В.Д. Выбор параметров газотурбинного двигателя, используемого в качестве привода нефтяного насоса // Машиностроение и компьютерные технологии. – 2017. – № 11. – С. 29–43.

20. Остапенко Н.Г., Новиков Р.С. Применение газотурбинных установок на нефтеперекачивающих станциях // Современные наукоемкие технологии. – 2013. – № 8–2. – С. 213–214.

21. Возможности использования газотурбинных двигателей на маневровых тепловозах / Г.К. Аширбаев, Г.Б. Бакыт, Е.Н. Сисекенова, А.М. Омирбек // Вестник Казахской академии транспорта и коммуникаций им. М. Тынышпаева. – 2015. – № 1. – С. 17–19.

22. Martinez A.S., Brouwer J., Samuelsen G.S. Feasibility study for SOFC-GT hybrid locomotive power: Part I. Development of a dynamic 3.5 MW SOFC-GT FORTRAN model // Journal of Power Sources. – 2012. – Vol. 213. – P. 203–217. DOI: org/10.1016/j.jpowsour.2012.04.024

23. Яишников В.И., Карпенко А.М. Газотурбинный двигатель для наземного транспорта // Вестник двигателестроения. – 2012. – № 1. – С. 73–77.

24. Volponi A.J. Gas turbine engine health management: past, present, and future trends // Journal of Engineering for Gas Turbines and Power. – 2014. – Vol. 136, № 5. – P. 051201. DOI: 10.1115/GT2013-96026

25. Концепция создания и перспективы применения семейства ГТД регенеративного цикла в горно-транспортной технике / В.Е. Беляев, В.Н. Бесчастных, В.Д. Евдокимов, М.В. Синкевич // Горная промышленность. – 2008. – № 3. – С. 76–80.

26. Nada T. Performance characterization of different configurations of gas turbine engines // Propulsion and Power Research. – 2014. – Vol. 3, № 3. – P. 121–132. DOI: 10.1016/j.jprr.2014.07.005

27. Карионов В.П., Саванович А.Г. Анализ применения газотурбинных двигателей в автомобильном двигателестроении // Научный вестник Вольского военного института материального обеспечения: военно-научный журнал. – 2009. – № 2 (24). – С. 270–273.
28. Меркулов В.И., Кустарев Ю.С. Энергетические машины и установки. – М.: МАМИ, 2011. – 257 с.
29. Манушин Э.А. Газотурбинные двигатели колесных и гусеничных машин // Итоги науки и техники. Сер.: Турбостроение. Т. 3 / ВИНТИ АН СССР. – М., 1984.
30. Транспортные машины с газотурбинными двигателями / Н.С. Попов, С.П. Изотов, В.В. Антонов [и др.] / под общ. ред. Н.С. Попова. – Л.: Машиностроение: Ленинградское отделение, 1987. – 258 с.
31. Зрелов В.А. Отечественные газотурбинные двигатели: основные параметры и конструктивные схемы. – М.: Машиностроение, 2005. – 336 с.
32. Иноземцев А.А., Сандрацкий В.Л. Газотурбинные двигатели / ОАО «Авиадвигатель». – Пермь, 2006. – 1204 с.
33. Кадыров С.М., Никитин С.Е., Ахметов Л.А. Автомобильные и тракторные двигатели. – М.: Мультимедийное издательство Стрельбицкого, 2007. – 616 с.
34. Чумаков Ю.А. Теория и расчет транспортных газотурбинных двигателей. – М.: ИНФРА-М.: Форум, 2012. – 448 с.
35. Никитин В.С., Половинкин В.Н., Барановский В.В. Современное состояние и перспективы развития отечественных газотурбинных энергетических установок // Труды Крыловского государственного научного центра. – 2017. – 3 (381). – С. 75–90. DOI: 10.24937/2542-2324-2017-2-380-70-91
36. Андреенков А.А., Дементьев А.А. Аспекты использования на автотракторной технике энергоустановок с поршневыми газотурбинными двигателями // Международный журнал прикладных и фундаментальных исследований. – 2018. – № 3. – С. 9–13.
37. Андреенков А.А., Дементьев А.А., Костюков А.В. Поршневые и газотурбинные энергетические установки для наземных транспортно-технологических средств. – М.: Московский Политех, 2017. – 80 с.
38. 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
39. 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
40. 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
41. Шкрабак В.С., Джаббаров Н.И. Эффективность применения газотурбинных двигателей на тракторах сельскохозяйственного назначения // Тракторы и сельхозмашины. – 2015. – № 10. – С. 46–48.
42. Методика нормирования расхода топлива автосамосвалами в глубоких карьерах / Ю.И. Лель, И.В. Зырянов, Д.Х. Ильбульдин, О.В. Мусихина, И.А. Глебов // Известия УГГУ. – 2017. – Вып. 4 (48). – С. 66–71. DOI 10.21440/2307-2091-2017-4-66-71
43. Дейнекин А.С., Спицын В.Е., Сташок А.Н. Газотурбинные двигатели ГП НПКГ «Зоря-МашПроект» промышленного применения // Территория нефтегаз. – 2010. – № 9. – С. 82–84.
44. Силовой модуль на базе ГТД-1250 для БелАЗа [Электронный ресурс]. – URL: <http://kadvi.ru/modul-dlya-belaza/> (дата обращения: 15.09.2018).
45. Газотурбинный двигатель ГТД-1250 и продукция на его базе [Электронный ресурс]. – URL: <http://kadvi.ru/product/gdt-1250/> (дата обращения: 15.09.2018).

References

1. Anistratov K.Iu. Mirovye tendentsii razvitiia struktury parka karernoj tekhniki [Global trends in the development of the structure of the mining equipment fleet]. *Gornaja promyshlennost*, 2011, no.6, pp.22-26.
2. Kuznetsov D.V., Odaev D.G., Linkov Ia.E. Osobnosti vybora tekhnologicheskogo avtotransporta dlia razrabotki glubokikh karerov severa [Features of the choice of technological vehicles for the development of deep quarries in the north]. *Gornyi informatsionno-analiticheskii biulleten*, 2017, no.5, pp.54-65.
3. Sheshko O.E. Ekologo-ekonomicheskoe obosnovanie vozmozhnosti snizheniia nagruzki na prirodnuu sredu ot karernogo transporta [Ecological and economic substantiation of the

possibility of reducing the load on the environment from mining]. *Gornyi informatsionno-analiticheskii biulleten*, 2017, no.2, pp.241-252.

4. Burmistrov K.V., Osintsev N.A., Shakshakpaev A.N. Selection of Open-Pit Dump Trucks during Quarry Reconstruction. *Procedia Engineering*, 2017, vol.206, pp.1696-1702. DOI.org/10.1016/j.proeng.2017.10.700

5. 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

6. Tyulenev M., Garina E., Khoreshok A., Litvin O., Litvin Y., Maliukhina E. A method of effective quarry water purifying using artificial filtering arrays. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*. IOP Publishing, 2017, vol.50, no.1, pp. 012035. DOI: 10.1088/1755-1315/50/1/012035

7. Feng Y., Dong Z., Yang J. Performance modeling and cost-benefit analysis of hybrid electric mining trucks. *Mechatronic and Embedded Systems and Applications (MESA). 12th IEEE/ASME International Conference*, 2016, pp.1-6. DOI: 10.1109/MESA.2016.7587102

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. 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

10. Jacobs W., Hodkiewicz M.R., Bräunl T. A cost-benefit analysis of electric loaders to reduce diesel emissions in underground hard rock mines. *IEEE Transactions on industry applications*, 2015, vol.51, no.3, pp.2565-2573. DOI: 10.1109/IAS.2014.6978456

11. Griaznov M.B. Primenenie gazomotornogo topliva v Rossiiskoi Federatsii: problemy i perspektivy [The use of gas motor fuel in the Russian Federation: problems and prospects]. *Vestnik finansovogo universiteta*, 2013, no.4, pp.21-31.

12. Markov V.A., Pozdniakov E.F. Prirodnyi gaz kak naibolee vygodnoe motornoe toplivo [Natural gas as the most profitable motor fuel]. *Avtomobilnaia promyshlennost*, 2017, no.1, pp.11-15.

13. Tarasov P.I., Khazin M.L., Furzikov V.V. Prirodnyi gaz – perspektivnoe motornoe toplivo karernogo avtotransporta dlia raionov severa [Natural gas is a promising motor fuel for mining

vehicles for the North]. *Gornaia promyshlennost*, 2016, no.6, pp.51-52.

14. 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

15. Daidzic N.E., Piancastelli L., Cattini A. Diesel engines for light-to-medium helicopters and airplanes. *International Journal of Aviation, Aeronautics, and Aerospace*, 2014, vol.1, no.3, pp.2-18. DOI: org/10.15394/ijaaa.2014.1023

16. Rybalko V.V. Gazoturbinniye reversivnyi dvigatel v korabelnoi energeticheskoi ustanovke [Gas turbine reversible engine in a ship power plant]. *Gazoturbinniye tekhnologii*, 2017, no.6 (149), pp.20-22.

17. Gırba I.A., Pruiu A., Ali B. Considerations on the use of maintenance programs for naval propulsion plants with gas turbines. *Mircea cel Batran. Scientific Bulletin Naval Academy*, 2014, vol.17, no.1, pp.43.

18. Sahu M.K., Choudhary T., Sanjay Y. Thermoeconomic investigation of different gas turbine cycle configurations for marine application. *SAE Technical Paper*, 2016, no.2016-01-2228. DOI: org/10.4271/2016-01-2228

19. Brycheva A.Iu., Moliakov V.D. Vybor parametrov gazoturbinnogo dvigatel'ia, ispolzuiuushchegosia v kachestve privoda neftianogo nasosa [Selection of parameters for a gas turbine engine used as an oil pump drive]. *Mashinostroenie i kompiuternye tekhnologii*, 2017, no.11, pp.29-43.

20. Ostapenko N.G., Novikov R.S. Primenenie gazoturbinnnykh ustanovok na nefteperekachivaiushchikh stantsiiakh [The use of gas turbines at oil pumping stations]. *Sovremennye naukoemkie tekhnologii*, 2013, no.8-2, pp.213-214.

21. Ashirbaev G.K., Bakyt G.B., Sisekenova E.N., Omirbek A.M. Vozmozhnosti ispolzovaniia gazoturbinnnykh dvigatelei na manevrovnykh teplovozhakh [Possibilities of using gas turbine engines on shunting diesel locomotives]. *Vestnik Kazakhskoi akademii transporta i kommunikatsii im. M. Tynyshpaeva*, 2015, no.1, pp.17-19.

22. Martinez A.S., Brouwer J., Samuelsen G.S. Feasibility study for SOFC-GT hybrid locomotive power: Part I. Development of a dynamic 3.5 MW SOFC-GT FORTRAN model. *Journal of Power Sources*, 2012, vol.213, pp.203-217. DOI: org/10.1016/j.jpowsour.2012.04.024

23. Iaishnikov V.I., Karpenko A.M. Gazoturbinniye dvigatel dlia nazemnogo transporta [Gas turbine engine for ground transportation]. *Vestnik dvigatelestroeniia*, 2012, no.1, pp.73-77.
24. Volponi A.J. Gas turbine engine health management: past, present, and future trends. *Journal of Engineering for Gas Turbines and Power*, 2014, vol.136, no.5, pp.051201. DOI:10.1115/GT2013-96026
25. Beliaev V.E., Beschastnykh V.N., Evdokimov V.D., Sinkevich M.V. Kontseptsiiia sozdaniia i perspektivy primeneniia semeistva GTD regenerativnogo tsikla v gorno-transportnoi tekhnike [The concept of creation and prospects for the use of the GTE family of the regenerative cycle in mining and transport equipment]. *Gornaia promyshlennost*, 2008, no.3, pp.76-80.
26. Nada T. Performance characterization of different configurations of gas turbine engines. *Propulsion and Power Research*, 2014, vol.3, no.3, pp.121-132. DOI: 10.1016/j.jprr.2014.07.005
27. Karionov V.P., Savanovich A.G. Analiz primeneniia gazoturbinniyykh dvigatelei v avtomobilnom dvigatelestroenii [Analysis of the use of gas turbine engines in automotive engines]. *Nauchnyi vestnik Volskogo voennogo instituta materialnogo obespecheniia: voenno-nauchnyi zhurnal*, 2009, no.2 (24), pp.270–273.
28. Merkulov V.I., Kustarev Iu.S. Energeticheskie mashiny i ustanovki [Power machines and installations]. Moscow, MAMI, 2011, 257 p.
29. Manushin E.A. Gazoturbinniye dvigateli kolesnykh i gusenichnykh mashin [Gas turbine engines of wheeled and tracked vehicles]. *Itogi nauki i tekhniki. Seriya: Turbostroenie*. Moscow, VINITI AN SSSR, 1984, vol.3.
30. Popov N.S., Izotov S.P., Antonov V.V. et al. Transportnye mashiny s gazoturbinnymi dvigateliami [Gas turbine transport vehicles]. Ed. N.S. Popov. Leningrad, Mashinostroenie, Leningradskoe otdelenie, 1987, 258 p.
31. Zrellov V.A. Otechestvennyye gazoturbinniye dvigateli: osnovnye parametry i konstruktivnye skhemy [Domestic gas turbine engines: basic parameters and design schemes]. Moscow, Mashinostroenie, 2005, 336 p.
32. Inozemtsev A.A., Sandratskii V.L. Gazoturbinniye dvigateli [Gas turbine engines]. Perm, Aviadvigatel, 2006, 1204 p.
33. Kadyrov S.M., Nikitin S.E., Akhmetov L.A. Avtomobilnye i traktornye dvigateli [Automotive and tractor engines]. Moscow, Multimediinoe izdatelstvo Strelbitskogo, 2007, 616 p.
34. Chumakov Iu.A. Teoriia i raschet transportnykh gazoturbinniyykh dvigatelei [Theory and calculation of transport gas turbine engines]. Moscow, INFRA-M: Forum, 2012, 448 p.
35. Nikitin V.S., Polovinkin V.N., Baranovskii V.V. Sovremennoe sostoianie i perspektivy razvitiia otechestvennykh gazoturbinniyykh energeticheskikh ustanovok [Current status and development prospects of domestic gas turbine power plants]. *Trudy Krylovskogo gosudarstvennogo nauchnogo tsentra*, 2017, 3 (381), pp.75-90. DOI: 10.24937/2542-2324-2017-2-380-70-91
36. Andreenkov A.A., Dementev A.A. Aspekty ispolzovaniia na avtotraktornoi tekhnike energoustanovok s porshnevymi gazoturbinnymi dvigateliami [Aspects of using power plants with reciprocating gas turbine engines on automotive machinery]. *Mezhdunarodnyi zhurnal prikladnykh i fundamentalnykh issledovaniy*, 2018, no.3, pp.9-13.
37. Andreenkov A.A., Dementev A.A., Kostjukov A.V. Porshnevye i gazoturbinniye energeticheskie ustanovki dlia nazemnykh transportno-tekhnologicheskikh sredstv [Piston and gas turbine power plants for ground transportation and technological means]. Moscow, Moskovskii politekh, 2017, 80 p.
38. 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
39. 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
40. 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
41. Shkrabak V.S., Dzhabborov N.I. Effektivnost primeneniia gazoturbinniyykh dvigatelei na traktorakh selskokhoziaistvennogo naznacheniia [Efficiency of using gas turbine engines on agricultural tractors]. *Traktory i selkhoz mashiny*, 2015, no.10, pp.46-48.

42. Lel Iu.I., Zyrianov I.V., Ibuldin D.Kh., Musikhina O.V., Glebov I.A. Metodika normirovaniia raskhoda topliva avtosamosvalami v glubokikh karerakh [Methods of rationing fuel consumption by dump trucks in deep open pits]. *Izvestiia UGGU*, 2017, iss.4 (48), pp.66-71. DOI: 10.21440/2307-2091-2017-4-66-71

43. Deinekin A.S., Spitsyn V.E., Stashok A.N. Gazoturbinnye dvigateli GP NPKG «Zoria-MashProekt» promyshlennogo primeneniia [Turbine engines GP NPKG "Zorya-MashProekt"

for industrial use]. *Territoria neftegaz*, 2010, no. 9, pp.82-84.

44. Silovoi modul na baze GTD-1250 dlia BELAZa [Power module based on GTD-1250 for BELAZ], available at: <http://kadvi.ru/modul-dlya-belaza/> (accessed 15 September 2018).

45. Gazoturbinni dvigatel GTD-1250 i produktsiia na ego baze [GTD-1250 gas turbine engine and products based on it], available at: <http://kadvi.ru/product/gdt-1250/> (accessed 15 September 2018).

Просьба ссылаться на эту статью в русскоязычных источниках следующим образом:

Хазин М.Л., Тарасов П.И., Фурзиков В.В. Применение газотурбинных двигателей для карьерных самосвалов в условиях севера // Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. Геология. Нефтегазовое и горное дело. – 2019. – Т.19, №3. – С.290–300. DOI: 10.15593/2224-9923/2019.3.8

Please cite this article in English as:

Khazin M.L., Tarasov P.I., Furzikov V.V. Application of gas-turbine engines for mining dumps in the conditions of the North. *Perm Journal of Petroleum and Mining Engineering*, 2019, vol.19, no.3, pp.290-300. DOI: 10.15593/2224-9923/2019.3.8