

УДК 622.23.05
Обзор / Review
© ПНИПУ / PNRPU, 2021



Направления развития карьерного автотранспорта

М.Л. Хазин

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

Directions of Career Transport Development

Mark L. Khazin

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

Получена / Received: 16.01.2020. Принята / Accepted: 30.04.2020. Опубликовано / Published: 01.07.2020

Ключевые слова:

карьерный самосвал, открытые горные работы, грузоподъемность, дизель, электропривод.

С начала возникновения цивилизации люди стали использовать добычу минералов на поверхности Земли и транспортировку горной массы. Одной из основных задач горнодобывающей промышленности является транспортировка все возрастающего количества горной массы из карьера, что вызвало необходимость повышения мощности и грузоподъемности карьерных самосвалов. На сегодняшний день можно полагать, что революционный период повышения грузоподъемности в создании большегрузных самосвалов закончился. Дальнейшее совершенствование конструкций рамных самосвалов нецелесообразно. Для создания сверхмощных самосвалов, способных эффективно транспортировать горную массу с глубоких горизонтов, необходимы принципиально другие конструкции машин и энергосиловых установок. Важнейшее требование к перспективным машинам – минимизация отрицательного влияния на окружающую среду. В своем развитии карьерный автотранспорт прошел длительный путь: ручная тачка – конная телега – грузовой автомобиль – дизельный карьерный самосвал – дизель-электрический карьерный самосвал – электрический карьерный самосвал – беспилотный электрический карьерный самосвал. Согласно закону перехода количества в качество можно полагать, что период повышения грузоподъемности карьерных самосвалов завершился (количественные изменения), и начинается новый период качественных изменений (разработка новых видов карьерного транспорта, повышение удельной мощности энергетической установки, применение других энергоносителей и т.п.). Важным направлением является применение искусственного интеллекта: роботизированных самосвалов, систем самодиагностики и др. Основное требование к перспективным машинам – уменьшение затрат на транспортировку горной массы и минимальное негативное влияние на окружающую среду.

Keywords:

mining dump truck; open pit mining; carrying capacity; diesel; electric drive.

Since the beginning of the civilization emergence, people began to use the minerals extraction on the surface of the Earth and the rock mass transportation. One of the main tasks of the mining industry is the transportation of an increasing rock mass amount from the quarry, which has caused the need to increase the power and carrying capacity of mining dump trucks. Today, we can assume that the revolutionary period of increasing the carrying capacity in the creation of heavy-duty dump trucks is over. Further improvement of the designs of frame dump trucks is impractical. To create super-powerful dump trucks capable of efficiently transporting rock mass from deep horizons, fundamentally different designs of machines and power plants are needed. The most important requirement for promising machines is to minimize the negative impact on the environment. In its development, mining vehicles have come a long way: a hand wheelbarrow - a horse cart - a truck - a diesel mining dump truck - a diesel-electric mining dump truck - an electric mining dump truck - an unmanned electric mining dump truck. According to the law of the transition from quantity to quality, it can be assumed that the period of increasing the carrying capacity of mining dump trucks has ended (quantitative changes), and a new period of qualitative changes begins (the development of new types of mining transport, an increase in the specific capacity of a power plant, the use of other energy carriers, etc.). An important area is the use of artificial intelligence: robotic dump trucks, self-diagnostic systems, etc. The main requirement for promising machines is to reduce the cost of transporting rock mass and a minimum negative impact on the environment.

Хазин Марк Леонтьевич – доктор технических наук, профессор кафедры эксплуатации горного оборудования (тел: +007 343 283 09 56, e-mail: Khasin@ursmu.ru).

Mark L. Khazin (Author ID in Scopus: 6506526940) – Doctor of Engineering, Professor of the Department of Mining Equipment Operation (tel: +007 343 283 09 56, e-mail: Khasin@ursmu.ru).

Просьба ссылаться на эту статью в русскоязычных источниках следующим образом:

Хазин М.Л. Направления развития карьерного автотранспорта // Недропользование. – 2021. – Т.21, №3. – С.144–150. DOI: 10.15593/2712-8008/2021.3.7

Please cite this article in English as:

Khazin M.L. Directions of Career Transport Development. *Perm Journal of Petroleum and Mining Engineering*, 2021, vol.21, no.3, pp.144-150. DOI: 10.15593/2712-8008/2021.3.7

Введение

Для транспортировки горной массы в карьерах и рудниках используются различные виды транспорта, основным из которых является автомобильный [1]. В своем развитии карьерный автотранспорт прошел длительный путь: ручная тачка – конная телега – грузовой автомобиль – дизельный карьерный автосамосвал – дизель-электрический карьерный автосамосвал – электрический карьерный автосамосвал – беспилотный электрический карьерный автосамосвал.

Как известно, первый вариант карьерного самосвала был разработан еще в 1930 г. в Кливленде (штат Огайо, США) фирмой Euclid Road Machinery, отличавшийся от других грузовиков повышенной проходимостью, ковшевым кузовом с задней разгрузкой и козырьком, защищающим водительскую кабину от сыпучих грузов.

Повышение грузоподъемности карьерных автосамосвалов как основное направление их развития было определено технологией горных работ – увеличением глубины карьеров и соответствующего плеча откатки. За прошедшее время, с 1930 по 2020 г., грузоподъемность карьерных автосамосвалов увеличилась почти в 56 раз – от 8 до 450 т (рис. 1).

Одновременно возрос и экологический ущерб, наносимый автотехникой окружающей среде. Поэтому в настоящее время все более актуальной становится проблема снижения негативного экологического воздействия горных машин и оборудования [5–7].

Любая материальная система развивается в направлении, при котором количественные изменения на определенном этапе приводят к качественным изменениям, а новое качество порождает новые возможности и интервалы количественных изменений. Согласно закону перехода количества в качество можно полагать, что период повышения грузоподъемности карьерных автосамосвалов завершился (количественные изменения) и начинается новый период качественных изменений (разработка новых видов карьерного транспорта, повышение удельной мощности энергетической установки, применение других энергоносителей и т. п.), а новое качество порождает новые возможности и интервалы количественных изменений.

Модернизация дизельного двигателя

Повышение грузоподъемности карьерных автосамосвалов сопровождалось увеличением мощности дизельного двигателя, независимо от того, использовался ли он как силовая установка автосамосвала или источник питания электрогенератора (рис. 2). А это, в свою очередь, привело к увеличению массы и габаритов двигателя, объемов потребляемого топлива и отработанных газов.

Мощность дизелей современных карьерных автосамосвалов (Caterpillar, Komatsu, Hitachi-Euclid, Terex, Liebherr, «БелАЗ») в основном не превышает 2000 кВт при грузоподъемности не более 250 т. Для карьерных автосамосвалов большей грузоподъемности применяются либо два двигателя, либо двигателя с увеличенными габаритами (с числом цилиндров 18, 20) [8].

Стремление горнодобывающих компаний снизить эксплуатационные расходы за счет сокращения затрат на дизельное топливо и ужесточение экологических требований привело к разработке более экономичных и малотоксичных дизельных двигателей. Системы управления температурным режимом работы двигателя ACERT и управления трансмиссией APES [9] позволяют повысить общую производительность двигателя, снизить расход топлива, объемы выбросов загрязняющих веществ и время прогрева. Тем не менее до 30 % топлива все еще расходуется на энергию, рассеиваемую в окружающем пространстве [10]. Применяемые в настоящее время двигатели для карьерных автосамосвалов основных компаний-производителей удовлетворяют требованиям экологического стандарта Tier II – Tier III (Stage II – Stage III). Последние модели автосамосвалов «БелАЗ» комплектуются двигателями Cummins, которые по экологическим требованиям соответствуют мировым нормам.

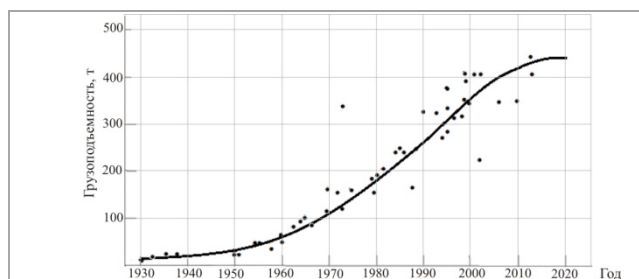


Рис. 1. Изменение грузоподъемности карьерных автосамосвалов (по данным [2–4])

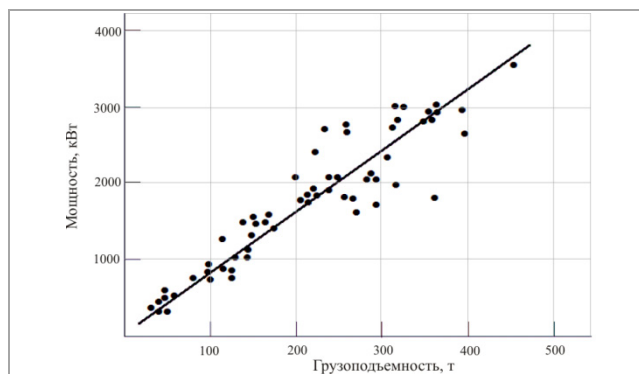


Рис. 2 Увеличение мощности силовой установки в зависимости от грузоподъемности карьерного автосамосвала

Энергоносители

Дизельное топливо. Интенсивное развитие открытых разработок в первой половине XX в. привело к увеличению количества глубоких и сверхглубоких карьеров [1, 11] и, следовательно, расстойанию, проходимо автосамосвалами. Вследствие этого повысились эксплуатационные расходы на добычу полезных ископаемых за счет увеличения потребления топлива и шин [12, 13]. В зависимости от условий эксплуатации типовой карьерный автосамосвал потребляет от 50 до 100 тыс. л дизельного топлива в год и выделяет от 130 до 260 т CO в отработанных газах. На транспортировку горной массы в мире ежегодно расходуются миллиарды литров дизельного топлива.

Воздушная контактная сеть. Рассмотрение вариантов, позволяющих горнодобывающим компаниям снизить затраты на дизельное топливо и тем самым уменьшить эксплуатационные расходы, привело к возобновлению интереса к троллейной транспортировке.

Карьерные автосамосвалы с электроприводом, оснащенные токоприемниками (троллейвозы), могут получать энергию непосредственно от воздушной контактной сети. Стоимость инфраструктуры, включающей в себя систему контактных сетей, тяговые подстанции, маты линий высокого напряжения, освещение системы провеса и токоприемник карьерного автосамосвала [13–16] составляет примерно 75 % от цены троллейвоза.

Использование питания от воздушной контактной сети позволяет уменьшить массу автосамосвала на 10–15 % за счет исключения дизельного двигателя, топливного и масляного баков, масляного и водяного радиаторов, систем отвода отработавших газов и ряда других при сохранении той же грузоподъемности.

Применение троллейвозов позволяет значительно снизить или исключить затраты на закупку, транспортировку и хранение дизельного топлива, повысить скорость движения автосамосвала на 44 %, сократить время транспортировки на 16 %, уменьшить расходы на проветривание карьера и экономить примерно 85 % топлива на каждом рабочем цикле [6, 12–16].

Основным энергетическим преимуществом троллейвоза по сравнению с автосамосвалом является возможность рекуперации в сеть кинетической энергии, выделяющейся

при торможении, и потенциальной энергии при движении под уклон.

Недостатками этой технологии являются высокие капитальные затраты, ограниченная мобильность и операционная гибкость. Для обеспечения работы требуется проложить троллейную трассу, а по мере выработки полезного ископаемого и «роста» карьера трассу необходимо дополнять новыми участками. Троллейвозам также требуется более широкое пространство для маневра, чем аналогичным дизельным машинам. При этом трасса должна быть удалена от места производства взрывов на 300–600 м. Кроме того, высоковольтные провода во время загрузки и разгрузки троллейвоза находятся достаточно близко, и создается опасность их повреждения.

Применение троллейвозов представляет собой привлекательную альтернативу для подземных и карьерных автосамосвалов, особенно при работе на длинных пандусах. Наилучшие результаты могут быть достигнуты в случае перемещения горной массы на расстояния, превышающие 1500 м, особенно когда дорога с воздушной контактной сетью может быть использована в течение нескольких лет, и объем транспортируемой горной массы составляет более 500 000 т в год. Согласно проведенным расчетам [6, 12–16], срок окупаемости системы с учетом повышения производительности карьерных автосамосвалов в троллейном режиме составляет 1–2 года. Кроме того, значительно снижается экологический ущерб, поскольку отсутствует выброс отработанных газов и, следовательно, исключается возможность загазованности и образования тумана в карьере или выработке. Техника безопасности при эксплуатации и обслуживании электрифицированного колесного карьерного автотранспорта и железнодорожного карьерного автотранспорта аналогична.

Полностью электрический автосамосвал. В настоящее время появился интерес к полностью электрическим автосамосвалам, поэтому машину сразу проектируют из расчета применения электродвигателя, чтобы максимально использовать все его преимущества [7]: универсальность, энергоэффективность, хорошее тяговое усилие (включая высокий крутящий момент при низких скоростях), отсутствие вредных выбросов, уменьшение потребности в вентиляции, снижение эксплуатационных расходов, хорошая перегрузочная способность, меньшая потребность в техническом обслуживании и более высокая производительность. К сожалению, их мобильность пока ограничена малой емкостью аккумуляторов: у свинцовых аккумуляторов примерно 144 кДж/кг, а у аккумулятора на основе фосфата лития железа (LiFePO₄) или LFP – 396 кДж/кг. Более эффективные литий-ионные батареи имеют емкость до 900 кДж/кг [17], но они пока не применяются для транспортных средств.

Аккумуляторные грузовики-погрузчики выпускаются канадской компанией RDH Mining Equipment. Грузовик-погрузчик Muckmaster 300EB с емкостью ковша 2 м³ и 20-тонный грузовик Haulmaster 800-20EB питаются от LFP батареи. С 2013 г. четыре Muckmaster 300EB и один Haulmaster 800-20EB работают на золотом руднике Macassa (Макасса) – озеро Киркленд, Онтарио, Канада [17]. Согласно информации компании RDH Mining Equipment, LFP батареи позволяют грузовикам-погрузчикам и грузовикам работать в среднем в течение 4 ч, что меньше продолжительности рабочей смены, которая обычно составляет от 8 до 12 ч.

Китайский концерн BYD Co. разработал трехосный карьерный автосамосвал полной массой 60 т, габаритной шириной 3,2 м и с полезным объемом кузова 30 м³. Автосамосвал BYD V60 с колесной формулой 6×4 предназначен для работы в угольных разрезах, а также плохо продуваемых карьерах. На тяговые электродвигатели и АКБ уже приходится 10 т, поэтому при полной массе 60 т грузоподъемность машины составляет всего 30 т. Следующим и улучшенным вариантом является швейцарская разработка – грузовик Lulph грузоподъемностью 65 т, созданный на базе дизельного автосамосвала Komatsu HD 605-7.

Электромоторы автосамосвала мощностью 590 кВт питаются от аккумуляторных никель-кобальт-марганцевых батарей общей емкостью 700 кВт ч и весом 4,5 т. Система рекуперативного торможения автосамосвала позволяет подзарядить батареи на 40 кВт ч. Поэтому в процессе эксплуатации 110-тонный автосамосвал не только потребляет электроэнергию, но и отдает в сеть до 200 кВт выработанной энергии. За период эксплуатации на цементном карьере Chasseral (Швейцария) с конца 2017 г. эти машины показали высокую рентабельность за счет экономии топлива и отсутствия выбросов углекислого газа [18, 19].

К недостаткам существующих аккумуляторов у таких машин можно отнести непродолжительный срок эксплуатации и небольшой запас хода в сравнении таковых в машинах двигателем внутреннего сгорания. К другим недостаткам аккумуляторов относятся стоимость (хранение 1 Вт·ч стоит примерно 1 евро) и их большой вес [20]. Однако следует учитывать возможность переработки аккумуляторов после окончания срока эксплуатации.

Использование газа в качестве моторного топлива. Основным видом альтернативного топлива является природный газ, который не смывает масляную пленку со стенок цилиндров и не образует отложений в топливной системе. Вследствие этого уменьшается трение и износ двигателя при увеличении срока его службы в 1,5–2 раза, а также снижается уровень шума на 50 % [21, 22]. Кроме того, выбросы загрязняющих веществ газовых двигателей в 1,5–5 раз менее опасны, чем у дизельных двигателей, что особенно существенно для глубоких карьеров. Еще одним преимуществом газа по сравнению с дизельным топливом является его значительно более низкая стоимость.

«БелАЗ-холдинг» разработал автосамосвал «БелАЗ-75476» грузоподъемностью 45 т с газопоршневым двигателем «Кунгур-550» мощностью 404 кВт, работающий на сжиженном природном газе (СПГ). При этом газовый автосамосвал экономичнее дизельного аналога «БелАЗ-7547», на 10 % мощнее и обеспечивает низкий уровень выбросов вредных веществ. В настоящее время готовится к выпуску 136-тонный карьерный автосамосвал «БелАЗ-7513» с газопоршневым двигателем Cummins KTA50-C.

Китай представил карьерный автосамосвал HOWO (производства автозавода Sinotruk) и тягач серии F3000, работающие на СПГ. Результаты испытаний показали двукратную экономию на топливе в денежном эквиваленте [23].

Проведенные испытания автосамосвалов Caterpillar 777 и 793, Komatsu 830 и 930 на СПГ на горных предприятиях США и Канады показали, что эффективность и производительность газового двигателя сопоставимы с таковой дизельного двигателя. Экономия дизельного топлива составила 80 %, а объем выбросов отработанных газов сократился на 25 %, обеспечивая при этом улучшение экологической ситуации [22].

Хотя система, разработанная Caterpillar, успешно прошла испытания в суровых условиях канадского климата, но из-за высокой цены за газотопливное оборудование данный проект экономически недостаточно выгоден. Лучших результатов в производстве газомоторного оборудования для карьерных автосамосвалов добилась компания GFS Corp.

На Ковдорском ГОК и в Кузбассе с 2015 г. начался перевод карьерных автосамосвалов на СПГ. Ожидается, что это позволит сократить затраты на топливную составляющую в себестоимости угля на 30–40 % и снизить негативное воздействие на окружающую среду [24].

АК «АЛРОСА» с 2015 г. также активно внедряет систему перевода техники на газовое топливо. Специфика Якутии такова, что топливо вынуждены завозить на год вперед и только в период навигации, что значительно увеличивает его стоимость. Тогда как газовые месторождения расположены близко к ГОК АК «АЛРОСА». Компания рассматривает как на замену дизельных двигателей эксплуатируемых карьерных автосамосвалов на газовые, так и на поставку автосамосвалов с газовыми двигателями. За счет

использования газа в качестве моторного топлива компания ожидает экономию на ГСМ до 100 млн руб. в год [25].

Топливные элементы и водород. В топливных элементах нет движущихся частей, их отличают долговечность, надежность и простота эксплуатации. Уже сейчас КПД топливных элементов составляет 50–70 %, что значительно больше, чем у ДВС, и является важным преимуществом перед современными двигателями на нефтяном топливе [26, 27]. Одной из наиболее перспективных разработок в данной сфере является водородный двигатель. В отличие от нефтяных источников энергии, водород не дает вредных выбросов в атмосферу и является наиболее экологически чистым – в окружающую среду выбрасывается только вода.

По сравнению со свинцово-кислотными АКБ, которые сегодня используются в большинстве электроприводов, водородные топливные элементы не нуждаются в частой и длительной зарядке батареи – достаточно периодически следить за наличием водорода в системе и проводить ее дозаправку.

Компания Nuvera (штат Массачусетс, США) специализируется на производстве и внедрении водородных топливных элементов, которые используются для электрических погрузчиков Yale. Компанией Sandia National Laboratories/CA разработан подземный транспортный тягач, силовая установка которого представляет собой батарею из топливных элементов на основе протонных обменных мембран в сочетании с обратимым металлгидридным аккумулятором. В ходе испытаний тягач показал низкий уровень шума и высокую экологическую чистоту [27].

В конце 2017 г. компания Toyota представила прототип грузовика с водородным двигателем и тягач, разработанный на базе модели Kenworth T660. В качестве силовой установки грузовика используются два электрических топливных элемента от легкого седана Toyota Mirai, а силовая установка тягача состоит из 740 топливных ячеек батареи Panasonic емкостью 12 кВт·ч, обеспечивающих мощность электромоторов 500 кВт [28].

Кроме явных достоинств, водородные топливные элементы имеют и недостатки. Первый из них – это высокая стоимость вследствие применения дорогих металлов платиновой группы. Второй недостаток – это вес и габариты, превышающие соответствующие параметры современных ДВС из-за большего количества необходимых узлов и агрегатов. Кроме того, еще окончательно не отработана технология их изготовления. Третья проблема – отсутствие водородных заправок.

Однако прогресс не стоит на месте, и появляются решения данных проблем. В скором времени водород сможет заменить бензин, дизельное топливо и газ, а топливные элементы будут использоваться в качестве основного силового агрегата карьерных автосамосвалов [29].

Многоколесники, многоосники и автопоезда

Дальнейшее повышение грузоподъемности карьерных автосамосвалов в настоящее время ограничено несущей способностью используемых шин и мощностью двигателя. Одним из вариантов обхода этих ограничений может быть применение многоколесной и многоосной схем, которые позволяют сразу решить следующие задачи:

- 1) более равномерно распределить нагрузку на дорогу, что позволяет работать на слабонесущих грунтах;
- 2) обеспечить маневренность в труднодоступных зонах, так как такая машина может разворачиваться практически на месте;
- 3) имеется возможность продолжать движение даже при повреждении нескольких шин.

Конструктивно многоосная машина может быть с неподвижными и поворотными осями. Например, на основе данной схемы – использование двоярных колес на каждой оси (общее количество – 8) – стало возможно достижение грузоподъемности 450 т у автосамосвала «БелАЗ-75710».

Китайская компания Wuhan Sanjiang Import & Export Company Limited (WSIEC) выпускает многоколесный автосамосвал WTW 220E грузоподъемностью 220 т и собственной массой 168 т с дизельным двигателем Cummins KTA38-CC, имеющий 16 колес, расположенных на восьми полуосях. Двенадцать из 16 колес имеют собственный электрический двигатель мощностью 110 кВт, получающий энергию от основного генератора.

Логическим развитием этого направления является создание автопоезда. Компания ETF разработала карьерный автосамосвал MT-240 (рис. 3) на шасси с полным приводом, причем все его пять пар колес являются управляемыми. Модульный дизайн позволяет создать широкую гамму автосамосвалов с различным количеством ведущих мостов от 2 до 5 осей и более с грузоподъемностью от 80 до 240 т. За счет объединения (сцепки) нескольких таких машин в единый автопоезд грузоподъемность MT-240 можно увеличить до 870 т [30].

Характерный для автопоездов принцип движения «колесо-в-колесо» и применение специальных устройств гарантируют их безопасное движение под уклон, исключая риск складывания прицепной части состава.

Многосекционные сочлененные карьерные автосамосвалы (автопоезда) имеют ряд важных преимуществ перед классическими двухосными тяжелыми машинами: возможность транспортировки горной массы на дальние расстояния (20–200 км) с высокой средней скоростью. Грузоподъемность карьерного автопоезда может регулироваться по требованию, с помощью подключения дополнительных автосамосвальных секций и даже путем сцепки дополнительного тягового агрегата. Положительный опыт эксплуатации многозвенных автопоездов Scania был получен в Удачинском ГОК [31, 32]. Экономия топлива составила примерно 25 % при повышении производительности на 12 % и уменьшении себестоимости перевозок на 20–35 %. Следствием является уменьшение количества отработавших газов, то есть улучшение экологической обстановки. Такие показатели дают горнодобывающим компаниям не только экологические преимущества, но и снижение стоимости транспортировки горной массы. Поэтому применение автопоездов является одним из самых перспективных направлений развития карьерного автотранспорта.

В целом у многоопорника есть и недостатки: он более сложен в ремонте, а при работе в тяжелых условиях повышается риск выхода из строя сложных элементов ходовой части. Тем не менее эта схема набирает популярность. В настоящее время автопоезда выпускают несколько компаний: ETF Trucks, Scania, Volvo, Powertrans, ТОНАР.

Автосамосвал с газотурбинным двигателем

Основными достоинствами газотурбинного двигателя (ГТД) являются малая удельная масса (0,25–0,30 массы дизеля), простота конструкции, практическое отсутствие расхода масла, облегчение запуска в зимних условиях, малый расход топлива в установившемся режиме (в 1,4 раза меньше, чем у дизеля) и др. Все это продемонстрировал еще в 1969 г. 120-тонный грузовик – «БелАЗ-549В» с газотурбинным двигателем (ГТД) мощностью 1200 л.с. Но все эти достоинства ГТД перекрывал один недостаток – на переходных режимах (разгон-торможение) расход топлива был огромный.

Однако за прошедшие 50 лет в двигателестроении появились новые материалы и технологии. Вследствие этого в последнее время вновь возрос интерес к применению ГТД для автотранспорта [33–35].

Высокая экономичность дизельного двигателя считается общеизвестной, но это утверждение не является абсолютным и в значительной мере определяется условиями эксплуатации. Например, при уменьшении температуры от +20 до –20 °С минимальный удельный расход топлива ГТД ГАЗ-902 уменьшается более чем на 10 %, тогда как расход топлива дизельного двигателя, наоборот, увеличивается на 8–10 % [36].



Рис. 3. Карьерный автосамосвал МТ-240 [30]

Современные образцы ГТД автомобилей имеют удельный расход топлива 200–270 кг/кВт ч [33–37], что сравнимо с показателями дизельного двигателя. Проведенные исследования [33] показали, что такие ГТД можно использовать для мощной внедорожной техники, в том числе карьерных автосамосвалов. Реализацией этой возможности стал карьерный автосамосвал «БелАЗ-75476» грузоподъемностью 45 т с газотурбинным двигателем «Кунгур-550», разработанным на базе двигателя ЯМЗ-240НМ2 повышенной мощности (550 л.с. против штатных 500 л.с.). С апреля 2018 г. «БелАЗ-75476» работает в АО «Невьянский цементник» (Свердловская область).

В продажу уже поступил серийный промышленный карьерный автосамосвал «БелАЗ» грузоподъемностью 90 т. В качестве силовой установки используется газотурбинный двигатель ГТД-1250 мощностью 1250 л.с. (920 кВт), выпускаемый ПАО «Калужский двигатель» [38]. Двигатель имеет массу 1050 кг и удельный расход топлива 225 г/л и значительно более низкий уровень выброса токсичных веществ.

Транспортные средства с комбинированной (гибридной) силовой установкой

С увеличением глубины карьеров повышаются средневзвешенный уклон автодорог и расстояние транспортирования, возрастают нагрузки на энергосиловую установку и трансмиссию автосамосвала. Одновременно увеличивается время движения порожнего автосамосвала и, следовательно, время «непроизводительной» работы ДВС на частичных нагрузках. На вспомогательных операциях транспортного цикла (составляющих 40–60 % времени рейса) расход топлива составляет 5–15 % от общего расхода за транспортный цикл [39].

Одним из вариантов экономии расхода топлива является применение на транспортном средстве гибридной или комбинированной энергосиловой установки (КЭУ), которая объединяет традиционный дизельный или бензиновый двигатель с бортовой перезаряжаемой системой хранения энергии, работающих независимо и последовательно [7, 14], например дизель-троллейбусы. При этом двигатель внутреннего сгорания может быть меньше, легче и эффективнее, чем у обычного самосвала, потому что он рассчитывается на средние затраты энергии, а не на пиковые значения. Высокий крутящий момент дизельного двигателя в сочетании с гибридной технологией может обеспечить значительно больший пробег. Причем в основном работает электрический двигатель с питанием от аккумулятора, а двигатель внутреннего сгорания используется для зарядки аккумулятора и для получения максимальных тягово-скоростных показателей при разгоне, движении на повышенных скоростях и в тяжелых дорожных условиях. Современные гибридные электромобили продлевают заряд своих батарей через рекуперативное торможение.

В странах Африки, в Бразилии, США и Европе давно и успешно эксплуатируется система транспорта с применением дизель-троллейбусов. Особенно показателен пример золоторудного карьера «Бетце» (США, штат Невада), где для транспортирования 410 тыс. т горной массы в сутки используется парк из 73 дизель-троллейбусов грузоподъемностью 170 т.

Троллейбусы успешно работают на угольных разрезах Grootegeluk в Южной Африке [13–15] и Grivice в RMU Banovici в Боснии-Герцеговине [16]. Для перевозки угля используются карьерные автосамосвалы-троллейбусы грузоподъемностью 254 т типа Euclid-Hitachi EH4500 AC. В марте 2013 г. на крупнейшей медной шахте в Африке Kansanshi (Кансанши) дизельный автопарк был полностью заменен на троллейбусы Hitachi EH3500ACII.

В настоящее время дизель-троллейбусы выпускают многие компании-производители: Hitachi, Komatsu, Caterpillar, Liebherr и «БЕЛАЗ».

Гусеничный карьерный автосамосвал

В связи с постепенной отработкой запасов полезных ископаемых равнинного типа неизбежен переход на разработку месторождений нагорного типа, расположенных, как правило, в неосвоенных районах. Нагорные карьеры, например Молодежное месторождение асбестового сырья, испытывают значительные трудности в выполнении различных работ на крутых косогорах, на которые не могут подниматься обычные карьерные машины.

Для эффективной работы в сложных горнотехнических условиях возникает необходимость создания принципиально нового типа карьерного транспорта – автосамосвала на гусеничном ходу с кузовом на поворотной платформе. Гусеничный движитель позволяет гусеничному автосамосвалу успешно производить транспортировку горной массы с места выемки до перегрузочных пунктов или складов. Его основными преимуществами (по сравнению с колесным) являются [39, 40]:

- высокие тягово-сцепные характеристики, обеспечивающие преодоление крутых уклонов (до 35 %) на номинальных режимах работы двигателя и трансмиссии при сравнительно высоких скоростях движения;
- высокая проходимость и приспособляемость гусеничного хода автосамосвала к неровностям дороги, что позволяет полностью исключить затраты на ее подготовку и специальное покрытие;
- высокая маневренность обеспечивает минимальное время на обмен автосамосвала под погрузку и на разгрузку;
- сравнительно низкое удельное давление на грунт обеспечит более безопасное перемещение по узким транспортным магистралям.

Конструкция гусеничного автосамосвала обеспечивает уменьшение его ширины по сравнению с существующими образцами карьерных автосамосвалов, что позволяет уменьшить ширину автодорог в карьере и дополнительно снизить объем вскрыши.

Наряду с основными функциями гусеничный автосамосвал может выполнять различные вспомогательные операции: буксировку оборудования, эвакуацию застрявших машин, доставку рабочего персонала. Существует перспектива создания на едином гусеничном шасси семейства унифицированных машин, включающего, кроме автосамосвала, буровой станок, тягач-эвакуатор, дорожно-строительные машины, мобильную мастерскую и сервисную машину (для технического обслуживания и ремонта), транспортер для перевозки людей и другую технику.

Использование гусеничного автосамосвала при разработке маломощных и близко расположенных к

дневной поверхности рудных тел позволит производить выемку и разработку крутонаклонной общей капитальной траншеи на всю глубину карьера без разноса бортов.

В настоящее время выпуском транспортных средств на гусеничном ходу занимается ряд зарубежных фирм: Hitachi Construction Machinery Co. Ltd., Komatsu, Morooka Co. Ltd, Sunbelt Equipment Marketing, Inc. (SEMI), Mitsubishi, Richard Larrington Ltd и другие. Машины этих производителей имеют резиново-металлические гусеничные ленты и предназначены для транспортировки грузов и строительных материалов по слабонесущим грунтам, отличаются хорошей маневренностью, скоростью перемещения грузов, большинство деталей унифицированы с гидравлическими экскаваторами соответствующих производителей. Однако представленные образцы зарубежной гусеничной техники спроектированы и изготовлены без учета сложных горнотехнических условий карьеров, поэтому применение их в качестве карьерного транспорта не представляется возможным.

ФГУП «КБТМ» (г. Омск), ФГУП «УКБТМ» (г. Нижний Тагил) представили технические предложения на создание гусеничных автосамосвалов грузоподъемностью 30 и 40 т. В мировой практике ведения открытых горных работ опыта использования гусеничной техники в качестве карьерного транспорта нет [39, 40].

Роботизированный карьерный автосамосвал

Применение беспилотных автосамосвалов в горном деле это уже не далекая перспектива, а реальность сегодняшнего дня. Водителя в них замещает центральный контроллер. Отсутствие кабины водителя позволяет значительно изменить компоновку и эргономику машины (рис. 4). Карьерные роботизированные автосамосвалы могут использоваться в телеуправляемом, полуавтономном и автономном режимах.

Каждый из автономных автосамосвалов оснащен контроллерами и системами GPS, обнаружения препятствий и системой беспроводной сети.

Горнопромышленный холдинг ОАО «СУЭК» (Россия) уже использует два роботизированных автосамосвала «БелАЗ-7513R» грузоподъемностью 136 т на разрезе Абаканский в Хакасии.

В 2015 г. роботизированный автопарк Британской горно-металлургической корпорации Rio Tinto на железорудном руднике Западной Австралии составлял 69 автосамосвалов [41].

Более чем 130 автономных автосамосвалов Komatsu AHS (Autonomous Haulage System) и Caterpillar (Cat 793F, Cat 797F и Cat 789D грузоподъемностью 227, 363 и 181 т соответственно) эксплуатируются на семи карьерах на трех континентах [41]. В 2018 г. компания Volvo Construction Equipment начала использовать автономные автосамосвалы-троллейбусы HX2 в карьере Вика-Кросс Гетеборг (Швеция) и автономные автосамосвалы Volvo FH для транспортировки известняка из карьера компании Vårnøy Kalk AS в порт [42].

Библиографический список

- 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
- Bozorgebrahimi E., Hall R., Scoble M. An investigation of the impact of haul truck size in surface mines on maintenance cost // *J. Mines, Metals Fuels, including Ind. Mining J.* – 2002. – October – November. – P. 371–379.
- Анистратов К.Ю. Мировые тенденции развития структуры парка карьерной техники // *Горная промышленность*. – 2011. – № 6. – С. 22–26.
- Humphreys D. Mining productivity and the fourth industrial revolution // *Mineral Economics*. – 2019. – P. 1–11. DOI: org/10.1007/s13563-019-00172-9.
- Кондратьев В.Б. Глобальная отрасль горного машиностроения // *Горная промышленность*. – 2018. – № 3 (139). – С. 26–34. DOI: org/10.30686/1609-9192-2018-3-139-26-34
- Шешко О.Е. Эколого-экономическое обоснование возможности снижения нагрузки на природную среду от карьерного транспорта // *ГИАБ*. – 2017. – № 2. – С. 241–252.
- Эколого-экономическая оценка использования карьерных самосвалов // М.Л. Хазин, В.В. Фурзиков, А.П. Тарасов // *Известия вузов. Горный журнал*. – 2018. – № 7. – С. 85–94. DOI: 10.21440/0536-1028-2018-7
- Тарасов П.И., Хазин М.Л., Фурзиков В.В. Перспективы применения газотурбинных двигателей в энергосиловых установках карьерных автосамосвалов большой и особо большой грузоподъемности // *Горная промышленность*. – 2018. – № 1 (137). – С. 49–51. DOI: org/10.30686/1609-9192-2018-1-137-49-51
- Dumakor N.K., Temeng V.A., Bansah K.J. Optimizing Shovel-Truck Fuel Consumption using Stochastic Simulation // *Ghana Mining Journal*. – 2017. – Vol. 17, № 2. – P. 39–49. DOI: 10.4314/gm.v17i26
- Nessim W., Zhang F.J., Zhao C.L. Optimizing operational performance of diesel mining truck using thermal management // *Advanced Materials Research*. – Trans Tech Publications. – 2013. – Vol. 813. – P. 273–277. DOI: https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/AMR.813.273
- Трубецкой К.Н., Рыльникова М.В. Состояние и перспективы развития открытых горных работ в XXI веке // *ГИАБ*. – 2015. – № S1-1. – С. 21–32.
- Cruzat J.V., Valenzuela M.A. Modeling and evaluation of benefits of trolley assist system for mining trucks // *IEEE Transactions on Industry Applications*. – 2018. – Vol. 54, № 4. – P. 3971–3981. DOI: 10.1109/TIA.2018.2823261
- Patterson S.R., Kozan E., Hyland P. Energy efficient scheduling of open-pit coal mine trucks // *European Journal of Operational Research*. – 2017. – Vol. 262, № 2. – P. 759–770. DOI: https://doi.org/10.1016/j.ejor.2017.03.081
- Lajunen A. Energy Efficiency of Conventional, Hybrid Electric, and Fuel Cell Hybrid Powertrains in Heavy Machinery // *SAE Technical Paper*. – 2015. – № 2015-01-2829. DOI: https://doi.org/10.4271/2015-01-2829
- Mazumdar J. All electric operation of ultraclass mining haul trucks // *Industry Applications Society Annual Meeting, 2013 IEEE. – IEE*. – 2013. – P. 1–5. DOI: 10.1109/IAS.2013.6682568
- Nurić S., Nurić A., Brčaninović M. Haulage solutions with trolley assist diesel-electric ac trucks on the pit mine RMU Banovici // *Journal of Mining and Metallurgy A: Mining*. – 2009. – Vol. 45, № 1. – P. 78–87.



Рис. 4. Роботизированные автосамосвалы: а – Komatsu; б – Volvo

На март 2019 г. в серию роботизированных автосамосвалов входят Cat 789D, Cat 793F, Cat 797F грузоподъемностью, соответственно, 181, 227 и 363 т. Эти машины самостоятельно реагируют на вызовы, поступающие от экскаватора, перемещаются в нужное положение, перевозят породу к месту разгрузки и предоставляют всю телеметрию, необходимую для принятия решения о проведении техобслуживания.

Во время рабочих циклов роботизированные автосамосвалы могут повторять траектории движения с точностью до нескольких сантиметров, что позволяет экономить на ширине проезжей части, уступных полок и крутизне подъемов, а также на количестве мест для разворота. Как показала практика, автономные грузовые перевозки могут повысить производительность на 15–20 %, уменьшить расход топлива на 10–15 %, снизить уровень износа шин на 5–15 %, сократить расходы на техническое обслуживание примерно на 8 % и повысить коэффициент использования автомобилей на 10–20 % с лучшей практикой вождения [41, 43–45]. Интеллектуальные системы способны заменить водителя на серпантинах горных разработок в трудных ситуациях, особенно после дождя и снега [43, 45]. Такие машины могут работать круглосуточно, исключая человеческий фактор, что позволяет уменьшить количество аварий и повысить безопасность эксплуатации. [41, 43–45].

Роботизированные автосамосвалы – более стабильная, предсказуемая и безопасная в эксплуатации техника. Большим интересом будут пользоваться комплексные решения – централизованные системы, позволяющие работать с флотом автономного транспорта и другими системами. Поэтому это направление сегодня и значится в числе наиболее развивающихся и перспективных.

Заключение

Карьерный автотранспорт исторически прошел длительный путь развития. Результаты применения уже первых вариантов новой горной техники – троллейбусов, роботизированных и газотурбинных автосамосвалов, использование газомоторного топлива, систем искусственного интеллекта – показывают возможность значительного сокращения затрат на транспортировку горной массы за счет экономии дизельного топлива, сокращения расстояний, повышения точности маршрута и увеличения экологической безопасности.

17. Paraszcak J., Svedlund E., Laflamme M. Electrification of loaders and trucks – a step towards more sustainable underground mining: ICREPQ14 // *Renewable Energy and Power Quality Journal (RE&PQJ)*. – 2014. – Vol. 1, № 12. – P. 81–86. DOI: <https://doi.org/10.24084/repq12.240>

18. Gao Z., Lin Z., Franzese O. Energy Consumption and Cost Savings of Truck Electrification for Heavy-Duty Vehicle Applications // *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board*. – 2017. – № 2628. – P. 99–109. DOI: <https://doi.org/10.3141/2628-11>

19. Franzese O. Energy Consumption and Cost Savings of Truck Electrification for Heavy-Duty Vehicle Applications // *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board*. – 2017. – № 2628. – P. 99–109. DOI: <https://doi.org/10.3141/2628-11>

20. Barthel J., Jung K., Seewig J. High-voltage DC trailing cable systems for mobile machinery // *IECON 2015: 41st Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society*. – 2015. – P. 001145–001151. DOI: <https://doi.org/10.1109/IECON.2015.7392254>

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](https://doi.org/10.2495/SD150211)

22. Fuel Switch to LNG in Heavy Truck Traffic // I. Smajla, K. Sedlar, B. Drljaca, L. Jukić // *Energies*. – 2019. – Vol. 12, № 3. – P. 515. DOI: <https://doi.org/10.3390/en12030515>

23. 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: 12.03.2021).

24. В Ковдорском ГОКе карьерные самосвалы переводят на сжиженный газ [Электронный ресурс]. – URL: <https://www.hibiny.com/news/archive/75172/> (дата обращения: 12.03.2021).

25. ALROSA заинтересована в переводе техники на сжиженный природный газ [Электронный ресурс]. – URL: <http://www.1sn.ru/206663.html> (дата обращения: 12.03.2021).

26. Kukkonen S. Energy consumption analysis of battery electric vehicles in underground environments // *Underground Mining Technology*. – 2017. – P. 569–580. DOI: https://doi.org/10.36487/ACG/rep/1710_46_Kukkonen

27. The role of hydrogen and fuel cells in the global energy system // I. Staffell, D. Scamman, A. Velazquez Abad [et al.] // *Energy Environ. Sci.* – 2019. – Vol. 12. – P. 463–491. DOI: <https://doi.org/10.1039/C8EE01157E>

28. Водородный тягач Toyota: новая версия и продолжение испытаний [Электронный ресурс]. – URL: <https://autoreview.ru/articles/gruzoviki-i-avtobusy/vodorodnyy-tyagach-toyota-novaya-versiya-i-prodolzhenie-ispytaniy> (дата обращения: 10.03.2021).

29. Топливные элементы для транспорта // В.А. Марков, В.М. Сивачев, С.М. Сивачев [и др.] // *Грузовик*. – 2016. – № 3. – С. 13–19.

30. ETF Mining Truck MT-240 [Электронный ресурс]. – URL: <http://shockauto.ru/etf-mining-truck-mt-240/> (дата обращения: 19.09.2019).

31. Опытнотомышленна эксплуатация многозвенных автопоездов SCANIA в Удачинском ГОКе // И.В. Зырянов, В.А. Павлов, А.П. Кондратюк [и др.] // *Горная промышленность*. – 2014. – № 6. – С. 38–40.

32. Автопоезда – новая техника для эффективного освоения кимберлитовых месторождений республики Саха (Якутия) // П.И. Тарасов, И.В. Зырянов, А.П. Кондратюк, М.Л. Хазин // *Горная промышленность*. – 2016. – № 5 (129). – С. 45–49.

33. 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.

34. Никитин В.С., Половинкин В.Н., Барановский В.В. Современное состояние и перспективы развития отечественных газотурбинных энергетических установок // *Труды Красноярского государственного научного центра*. – 2017. – Т. 3(381). – С. 75–90. DOI: [10.24937/2542-2324-2017-2-380-70-91](https://doi.org/10.24937/2542-2324-2017-2-380-70-91)

35. 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: [10.1115/1.1201396](https://doi.org/10.1115/1.1201396)

36. 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](https://doi.org/10.2495/SDP-V12-N6-1006-1017)

37. Дайнекин А.С., Спичин В.Е., Штакш А.Н. Газотурбинные двигатели ГТНПК «Зоря-МашПроект» Промышленного применения // *Территория нефтегаз*. – 2010. – № 9. – С. 82–84.

38. Публичное Акционерное общество «Калужский двигатель» [Электронный ресурс]. – URL: <http://kadvi.ru/modul-dlya-belaza/> (дата обращения: 26.02.2021).

39. Конструкции гусеничного ходового механизма для карьерных самосвалов, эксплуатирующихся на глубоких горизонтах // П.И. Тарасов, И.В. Зырянов, М.Л. Хазин [и др.] // *Горная промышленность*. – 2016. – № 2 (126). – С. 80–86.

40. Конструктивные схемы гусеничных самосвалов для работы в карьерах с повышенными уклонами выработок // П.И. Тарасов, А.В. Глебов, В.О. Фурин [и др.] // *Горная промышленность*. – 2008. – № 2 (78). – С. 63–68.

41. Dadich S., Bodin U., Andersson U. Key challenges in automation of earth-moving machines // *Automation in Construction*. – 2016. – Vol. 68. – P. 212–222. DOI: [10.1016/j.autcon.2016.05.009](https://doi.org/10.1016/j.autcon.2016.05.009)

42. Volvo's first commercial self-driving trucks will be used in mining [Электронный ресурс]. – URL: <https://venturebeat.com/2018/11/20/volvos-first-commercial-self-driving-trucks-will-be-used-in-mining/> (дата обращения: 16.03.2021).

43. Бигель Н.В. Преимущества и возможности роботизированного карьерного самосвала грузоподъемностью 130 тонн // *ГИАБ*. – 2017. – № S38. – С. 53–57. DOI: [10.25018/0236-1493-2017-12-38-53-57](https://doi.org/10.25018/0236-1493-2017-12-38-53-57)

44. Schoettle B., Sivak M. Potential Improvements in Safety and Efficiency with Autonomous Trucking, 2017. – № SWT-2017-19.

45. Гучек Е.М., Клебанов Д.А. Преимущества и возможности роботизированного карьерного самосвала БЕЛАЗ грузоподъемностью 130 т // *Золото и технологии*. – 2017. – № 4 (38). – С. 78–81.

References

1. Burmistrov K.V., Osintsev N.A., Shakhshakpaev 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](https://doi.org/10.1016/j.proeng.2017.10.700)

2. Bozorgebrahimi E., Hall R., Scoble M. An investigation of the impact of haul truck size in surface mines on maintenance cost. *J. Mines, Metals Fuels, including Ind. Mining J*, 2002, October-November, pp. 371-379.

3. Anistratov K.Iu. Mirovye tendentsii razvitiia struktury parka kar'ernoi tekhniki [World trends of the surface mining machinery fleet development]. *Gornaya promyshlennost'*, 2011, no. 6, pp. 22-26.

4. Mumphreys D. Mining productivity and the fourth industrial revolution. *Mineral Economics*, 2019, pp. 1-11. DOI: [org/10.1007/s13563-019-00172-9](https://doi.org/10.1007/s13563-019-00172-9)

5. Kondrat'ev V.B. Globalnaia orast' proizvodstva mashinostroyeniia [Global mining engineering industry]. *Gornaya promyshlennost'*, 2018, no. 3(139), pp. 26-34. DOI: [org/10.30686/1609-9192-2018-3-139-26-34](https://doi.org/10.30686/1609-9192-2018-3-139-26-34)

6. Sheshko O.E. Ekologicheskoe obosnovanie i vozmozhnosti snizheniia nagruzk na prirodnomu srediu ot kar'ernogo transporta [Ecological and economic substantiation of the possibility to reduce the load on the nature environment from open pit transport]. *GLAB*, 2017, no. 2, pp. 241-252.

7. Khazin M.L., Tarasov P.I., Furzikov V.V., Tarasov A.P. Ekologicheskaya otsenka ispol'zovaniia kar'ernykh samosvalov [Ecological and economic evaluation of open pit dump trucks use]. *Investitsii i razvitiie. Gornyi zhurnal*, 2018, no. 7, pp. 85-94. DOI: [10.21144/0536-1028-2018-7](https://doi.org/10.21144/0536-1028-2018-7)

8. Tarasov P.I., Khazin M.L., Furzikov V.V. Perspektivy primeneniia gazoturbinykh dvigateli v energosilosykh ustanovkakh kar'ernykh avtosamosvalov bolshoi i osobno bolshoi grupopod'emnosti [Prospects of gas-turbine engine-based propulsion plants application with mine haulers]. *Gornaya promyshlennost'*, 2018, no. 1(137), pp. 49-51. DOI: [org/10.30686/1609-9192-2018-1-137-49-51](https://doi.org/10.30686/1609-9192-2018-1-137-49-51)

9. Dumakov N.K., Temeng V.A., Bansak K.J. Optimising Shovel-Truck Fuel Consumption using Stochastic Simulation. *Ghana Mining Journal*, 2017, vol. 17, no. 2, pp. 99-49. DOI: [10.4314/gmj.v17i2.6](https://doi.org/10.4314/gmj.v17i2.6)

10. Nessim W., Zhang F.J., Zhao C.L. Optimizing operational performance of diesel mining truck using thermal management. *Advanced Materials Research*. Trans Tech Publications, 2013, vol. 813, pp. 273-277. DOI: <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/AMR.813.273>

11. Trubetskoi K.N., Rylnikova M.V. Sostoianie i perspektivy razvitiia otkrytykh gornykh rabot v XXI veke [Situation and prospects of open-pit mining development in the XXI century]. *GLAB*, 2015, no. 51-1, pp. 21-32.

12. Cruzat J.V., Valenzuela M.A. Modeling and evaluation of benefits of trolley assist system for mining trucks. *IEEE Transactions on Industry Applications*, 2018, vol. 54, no. 4, pp. 3971-3981. DOI: [10.1109/TIA.2018.2823261](https://doi.org/10.1109/TIA.2018.2823261)

13. Patterson S.R., Kozan E., Hyland P. Energy efficient scheduling of open-pit coal mine trucks. *European Journal of Operational Research*, 2017, vol. 262, no. 2, pp. 759-770. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ejor.2017.03.081>

14. Lajunen A. Energy Efficiency of Conventional, Hybrid Electric, and Fuel Cell Hybrid Powertrains in Heavy Machinery. *SAE Technical Paper*, 2015, no. 2015-01-2829. DOI: <https://doi.org/10.4271/2015-01-2829>

15. Mazumdar J. All electric operation of ultraclass mining haul trucks. *Industry Applications Society Annual Meeting, 2013 IEEE*. IEEE, 2013, pp. 1-5. DOI: [10.1109/IAS.2013.6682568](https://doi.org/10.1109/IAS.2013.6682568)

16. Nurić S., Nurić A., Brćaninović M. Haulage solutions with trolley assist diesel-electric at trucks on the pit mine RMU Banovići. *Journal of Mining and Metallurgy A: Mining*, 2009, vol. 45, no. 1, pp. 78-87.

17. Paraszcak J., Svedlund E., Laflamme M. Electrification of loaders and trucks – a step towards more sustainable underground mining: ICREPQ14. *Renewable Energy and Power Quality Journal (RE&PQJ)*, 2014, vol. 1, no. 12, pp. 81-86. DOI: <https://doi.org/10.24084/repq12.240>

18. Gao Z., Lin Z., Franzese O. Energy Consumption and Cost Savings of Truck Electrification for Heavy-Duty Vehicle Applications. *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board*, 2017, no. 2628, pp. 99-109. DOI: <https://doi.org/10.3141/2628-11>

19. Franzese O. Energy Consumption and Cost Savings of Truck Electrification for Heavy-Duty Vehicle Applications. *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board*, 2017, no. 2628, pp. 99-109. DOI: <https://doi.org/10.3141/2628-11>

20. Barthel J., Jung K., Seewig J. High-voltage DC trailing cable systems for mobile machinery. *IECON 2015: 41st Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society*, 2015, pp. 001145-001151. DOI: <https://doi.org/10.1109/IECON.2015.7392254>

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](https://doi.org/10.2495/SD150211)

22. Smajla I., Sedlar K., Drljaca B., Jukić L. Fuel Switch to LNG in Heavy Truck Traffic. *Energies*, 2019, vol. 12, no. 3, p. 515. DOI: <https://doi.org/10.3390/en12030515>

23. Kompaniia Shacman predstavliaet novyi tyagach i samosval [Shacman Introduces New Tractor and Dump Truck, available at: <http://7305555.ru/company/news/shacman-predstavit-noviy-tyagach-i-samosval-spg.html> (accessed 12 March 2021).

24. V Kovdorskomo GOKe kar'ernye samosvaly perevodiat na szhizhennyi gaz [Mining dump trucks are converted to liquefied gas] [Mining dump trucks are converted to liquefied gas], available at: <https://www.hibiny.com/news/archive/75172/> (accessed 12 March 2021)

25. ALROSA zainteresovana v perevode tekhniki na szhizhennyi prirodnyi gaz [ALROSA is interested in converting equipment to liquefied natural gas], available at: <http://www.1sn.ru/206663.html> (accessed 12 March 2021)

26. Kukkonen S. Energy consumption analysis of battery electric vehicles in underground environments. *Underground Mining Technology*, 2017, pp. 569-580. DOI: https://doi.org/10.36487/ACG/rep/1710_46_Kukkonen

27. Staffell I., Scamman D., Velazquez Abad A. et al. The role of hydrogen and fuel cells in the global energy system. *Energy Environ. Sci.* 2019, vol. 12, pp. 463-491. DOI: <https://doi.org/10.1039/C8EE01157E>

28. Vodorodnyi tyagach Toyota: novaya versia i prodolzhenie ispytaniy [Toyota hydrogen tractor: new version and continuation of tests], available at: <https://autoreview.ru/articles/gruzoviki-i-avtobusy/vodorodnyy-tyagach-toyota-novaya-versiya-i-prodolzhenie-ispytaniy> (accessed 10 March 2021)

29. Markov V.A., Sivachev V.M., Sivachev S.M. et al. Toplivnye elementy dlia transporta [Fuel cells for transport]. *Gruzovik*, 2016, no. 3, pp. 13-19.

30. ETF Mining Truck MT-240, available at: <http://shockauto.ru/etf-mining-truck-mt-240/> (accessed 19 September 2019).

31. Zyrjanov I.V., Pavlov V.A., Kondratyuk A.P. et al. Opytnotomyslennaiia ekspluatatsiia mnogozvennykh avtopoezdov SCANIA v Udachinskomo GOKe [Pilot operation of SCANIA long haul trucks at the Udachinsky GOK]. *Gornaya promyshlennost'*, 2014, no. 6, pp. 38-40.

32. Tarasov P.I., Zyrjanov I.V., Kondratyuk A.P., Khazin M.L. Avtopoezda – novaiia tekhnika dlia effektivnogo osvoiniia kimbberlitovykh mestorozhdenii respublikii Sakha (Iakutiia) [Long-haul tractor-trailer caravans as new transport vehicles for the efficient development of kimberlite fields in Yakutia]. *Gornaya promyshlennost'*, 2016, no. 5(129), pp. 45-49.

33. B'el'iaev V.E., Beschastnykh V.N., Evdokimov V.D., Sinkevich M.V. Kontseptsiiia sozdaniia i perspektivy primeneniia semeistva GTD regenierativnogo tsikla v gorno-transportnoi tekhnike [Design concept and implementation potential of the regenerative cycle GTD line in mining transportation machinery]. *Gornaya promyshlennost'*, 2008, no. 3, pp. 76-80.

34. Nikitin V.S., Polovinkin V.N., Baranovskii V.V. Sovremennoe sostoianie i perspektivy razvitiia otkrytykh gornykh rabot v XXI veke [Current status and future development prospects of Russian marine diesel power plants]. *Tруды Красноярского государственного научного центра*, 2017, vol. 3(381), pp. 75-90. DOI: [10.24937/2542-2324-2017-2-380-70-91](https://doi.org/10.24937/2542-2324-2017-2-380-70-91)

35. 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, p. 051201. DOI: [10.1115/1.1201396](https://doi.org/10.1115/1.1201396)

36. 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](https://doi.org/10.2495/SDP-V12-N6-1006-1017)

37. Daineikin A.S., Spitsyn V.E., Shatak A.N. Gazoturbinye dvigateli G4P NPKG «Zoria-MashProekt» Promyshlennogo primeneniia [Gas turbine engines GP NPKG "Zorya-MashProekt" Industrial application]. *Territoria neftegaz*, 2010, no. 9, pp. 82-84.

38. Publichnoe Aktsionerное obshchestvo «Kaluzhskii dvigatel» [Public Joint Stock Company "Kaluzhskii dvigatel"], available at: <http://kadvi.ru/modul-dlya-belaza/> (accessed 26 February 2021).

39. Tarasov P.I., Zyrjanov I.V., Khazin M.L. et al. Konstruksii gusenichnogo khodovogo mekhanizma dlia kar'ernykh samosvalov, ekspluatiruiushchikhsia na glubokikh gorizontalakh [Constructions of crawler running gear of tracked vehicles in operation at deep horizons of open pits]. *Gornaya promyshlennost'*, 2016, no. 2(126), pp. 80-86.

40. Tarasov P.I., Glebov A.V., Furin V.O. et al. Konstruktivnye skhemy gusenichnykh samosvalov dlia raboty v kar'erakh s povyshennymi uklonami vyrobotok [Structural diagrams of tracked dump trucks for working in open pits with elevated slopes]. *Gornaya promyshlennost'*, 2008, no. 2(78), pp. 63-68.

41. Dadich S., Bodin U., Andersson U. Key challenges in automation of earth-moving machines. *Automation in Construction*, 2016, vol. 68, pp. 212-222. DOI: [10.1016/j.autcon.2016.05.009](https://doi.org/10.1016/j.autcon.2016.05.009)

42. Volvo's first commercial self-driving trucks will be used in mining, available at: <https://venturebeat.com/2018/11/20/volvos-first-commercial-self-driving-trucks-will-be-used-in-mining/> (accessed 16 March 2021).

43. Bigel' N.V. Preimushchestva i vozmozhnosti robotizirovannogo kar'ernogo samosvala grupopod'emnosti 130 tonn [Advantages and capabilities of a robotic mining dump truck with a lifting capacity of 130 tons]. *GLAB*, 2017, no. S38, pp. 53-57. DOI: [10.25018/0236-1493-2017-12-38-53-57](https://doi.org/10.25018/0236-1493-2017-12-38-53-57)

44. Schoettle B., Sivak M. Potential Improvements in Safety and Efficiency with Autonomous Trucking, 2017, no. SWT-2017-19.

45. Guchek E.M., Klebanov D.A. Preimushchestva i vozmozhnosti robotizirovannogo kar'ernogo samosvala BELAZ grupopod'emnosti 130 t [Advantages and capabilities of a robotic mining dump truck BELAZ with a lifting capacity of 130 t]. *Zoloto i tekhnologii*, 2017, no. 4(38), pp. 78-81.