

УДК 622.68

Статья / Article

© ПНИПУ / PNRPU, 2018

ЭКОЛОГО-ЭКОНОМИЧЕСКАЯ ОЦЕНКА КАРЬЕРНЫХ ТРОЛЛЕЙВОЗОВ

М.Л. Хазин, А.П. Тарасов¹

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

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

ECOLOGICAL AND ECONOMIC EVALUATION OF QUARRY TROLLEY TRUCKS

Mark L. Khazin, Aleksandr P. Tarasov¹

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

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

Получена / Received: 17.04.2018. Принята / Accepted: 09.06.2018. Опубликовано / Published: 29.06.2018

Ключевые слова:

карьерные самосвалы, экология, открытые горные работы, выбросы, дизельное топливо, троллейвоз, энергосбережение, самосвал.

Основным способом добычи полезных ископаемых являются открытые горные работы. До 80 % горной массы, получаемой при этом, перевозится карьерными самосвалами с дизельными двигателями. Существенным недостатком использования дизельного автотранспорта является загазованность атмосферы, особенно на глубоких горизонтах. Выхлопные газы дизельного автотранспорта оказывают вредное влияние на здоровье человека и окружающую среду. При постоянном воздействии выхлопных газов на организм могут развиваться иммунодефицит, бронхиты, страдают сосуды головного мозга, нервная система. С ростом глубины горных работ возрастает концентрация техники на горизонтах, ухудшаются условия естественного проветривания рабочего пространства карьеров. На глубине карьеров более 200–250 м загрязнение воздуха вредными веществами на рабочих местах приводит к постепенному превышению предельно допустимых концентраций. Это сказывается не только на людях, но и на экономике предприятия, так как влечет за собой необходимость остановки карьера, ухудшение видимости на трассе, что также обуславливает частично или полностью приостановку работы оборудования. Перспективным направлением решения проблемы является перевод карьерных самосвалов на электроэнергию. В совокупности все положительные качества троллейвоза понижают эксплуатационные расходы на транспортирование горной массы на 15–20 %, а также исключают загазованность карьера и образование дыма. Самым серьезным недостатком троллейвоза является необходимость в питании от контактной сети. В настоящее время, благодаря современным технологиям, устранение большинства недостатков троллейвоза не представляет сложности. Карьерные троллейвозы лучше использовать только на долгосрочных разработках, поскольку содержание контактной сети троллейных линий требует ухода и обслуживания. Срок окупаемости затрат может составить 2–4 года.

Key words:

quarry dump trucks, ecology, open-pit mining, emissions, diesel fuel, trolley truck, energy saving, dumper.

Open-cut mining is the main way to extract minerals. Up to 80% of the rock mass produced by that is transported by dump trucks with diesel engines. Atmospheric gas pollution is an essential disadvantage of using diesel vehicles, especially in deep formations. Exhaust gases from diesel vehicles have a detrimental effect on human health and the environment. Constant exposure of exhaust gases on the body can cause immune deficiency, bronchitis, cerebral vessels and nervous system suffer. The higher the depth of mining the higher the concentration of machinery on formations and the worse the conditions of natural ventilation of the working space. At the depth of quarries over 200–250 m air pollution by harmful substances at the workplace leads to a gradual increase of the maximum permissible concentrations. That affects both people and economy of the enterprise since it entails the necessity to shut the career down, deteriorate visibility on the highway, which also causes a partial or total suspension of equipment operation. Transfer of dump trucks to electricity is a prospect way to solve the problem. Together, all the positive qualities of trolley trucks reduce the maintenance costs of transportation of rock mass by 15–20%, as well as exclude the gassing of the quarry and formation of smoke. Need for power from the contact network is the most serious drawback of trolley truck. Today, thanks to modern technologies, eliminating most of the drawbacks of trolley trucks is not difficult. Quarry trolley trucks are better used only for long-term development, since the content of the trolley line contact requires attendance and maintenance. The payback period can be 2–4 years.

Хазин Марк Леонтьевич – доктор технических наук, профессор (тел.: +007 912 269 81 72, e-mail: Khasin@ursmu.ru). Контактное лицо для переписки.
Тарасов Александр Петрович – инженер (тел.: +007 902 872 81 17, e-mail: tp6005@mail.ru).

Mark L. Khazin – Doctor of Engineering, Professor (tel.: +007 912 269 81 72, e-mail: Khasin@ursmu.ru). The contact person for correspondence.
Aleksandr P. Tarasov – Engineer (tel.: +007 902 872 81 17, e-mail: tp6005@mail.ru).

Введение

Характерной особенностью современного периода является увеличение глубины разработки месторождений и усложнение горно-геологических условий месторождений. Наиболее сложное, трудоемкое и затратное звено процесса разработки месторождений полезных ископаемых открытым способом – транспорт, доля которого в себестоимости добычи составляет 60–75 %, особенно в глубоких карьерах [1]. При добыче полезных ископаемых открытым способом основным видом технологического транспорта является автомобильный. Он используется для перевозки примерно 80 % всей горной массы. При этом мировой горнодобывающей промышленностью ежегодно потребляется миллиарды литров дизельного топлива, причем 70–80 % общего объема топлива потребляют нагруженные самосвалы на подъемах.

Воздействие выбросов дизельных двигателей на здоровье людей и окружающую среду

Согласно данным компании Parker Wau, количество эксплуатируемых в мире карьерных самосвалов за 2014 г. увеличилось с 38,5 до 43,0 тыс. единиц. В 2012 г. в карьерах России работало 1725 карьерных самосвалов. Только «БелАЗ» ежегодно продает в России около 800 самосвалов, и это число постоянно увеличивается. В январе-феврале 2018 г. на российский рынок было поставлено на 40 единиц карьерных самосвалов больше, чем в прошлом году за этот же период [2].

Все современные автомобили, используемые в карьерах, оснащены дизелями мощностью 150–2600 кВт с турбонаддувом, рабочим объемом от 10 до 117 л [3]. Наряду с многочисленными достоинствами у автомобильного транспорта имеются и определенные недостатки. Одним из существенных недостатков применения дизельного автотранспорта в его современном виде является выброс значительного объема выхлопных газов, что приводит к загазованности атмосферы, особенно на глубоких горизонтах.

Выхлопные газы – это неоднородная смесь различных газообразных веществ с разнообразными химическими и физическими

свойствами, состоящая из продуктов полного и неполного сгорания топлива, избыточного воздуха, аэрозолей и различных микропримесей (как газообразных, так и в виде жидких и твердых частиц), поступающих из цилиндров двигателей в его выпускную систему. В своем составе они содержат около 300 веществ, большинство из которых токсичны, что негативно влияет на здоровье человека и окружающую среду. Основными нормируемыми токсичными компонентами выхлопных газов двигателей являются оксиды углерода, азота и углеводорода. Кроме того, с выхлопными газами в атмосферу поступают предельные и непредельные углеводороды, альдегиды, канцерогенные вещества, сажа и другие компоненты (табл. 1).

Таблица 1

Примерный состав выхлопных газов дизельного двигателя

Компонент выхлопного газа	Содержание по объему, %	Токсичность
Азот	76,0–78,0	Нет
Кислород	2,0–18,0	Нет
Пары воды	0,5–4,0	Нет
Диоксид углерода	1,0–10,0	Нет
Оксид углерода	0,01–0,2	Да
Углеводороды неканцерогенные	0,009–0,5	Да
Альдегиды	0,001–0,009	Да
Оксид серы	0–0,03	Да
Сажа, г/м ³	0,01–1,1	Да
Бензпирен, мг/м ³	До 0,01	Да

Оксиды азота вызывают головную боль, потерю сознания, а также раздражение дыхательных путей.

Диоксид серы, едкий газ вызывают острое раздражение глаз, носа и горла.

Углеводороды (C_nH_m – этан, метан, этилен, бензол и др.) являются токсичными веществами. Содержание C_nH_m в выхлопных газах возрастает при дросселировании, при работе двигателя на режимах принудительного холостого хода, например при торможении. Они играют активную роль в образовании биологически активных веществ, вызывающих раздражение глаз, горла, носа и их заболевание и наносящих ущерб растительному и животному миру. Углеводородные соединения оказывают наркотическое действие на

центральную нервную систему, могут являться причиной хронических заболеваний. Углеводороды (олефины) и оксиды азота при определенных метеорологических условиях активно способствуют образованию смога.

Дизельные частицы (Particulate Matter, PM) являются сложной совокупностью твердого и жидкого материалов, которые агломерируют канцерогенные вещества – полициклические ароматические углеводороды. Частицы имеют очень сложный состав и могут содержать до 43 % сажи, до 5 % нерастворимых фракций масла, до 10 % растворимых фракций топлива и до 13 % сульфатов и паров воды [4, 5].

Наибольшую опасность представляют наночастицы диаметром менее 50 нм, глубоко проникающие в легкие человека и способствующие развитию сердечно-сосудистых и раковых заболеваний. Причем новые более современные модели дизелей выделяют большее количество мелких частиц, чем дизели, изготовленные по старой технологии [5].

Кроме того, дизельные двигатели характеризуются повышенной дымностью. Дымность дизельных двигателей, или смог от выхлопных газов, – ядовитый туман, образуемый в нижнем слое атмосферы, загрязненном выхлопными газами от автотранспорта при неблагоприятных погодных условиях. Он представляет собой аэрозоль, состоящий из дыма, тумана, пыли, частичек сажи, капелек жидкости (во влажной атмосфере). Возникает в атмосфере при определенных метеорологических условиях. Поступающие в атмосферу вредные газы вступают в реакцию между собой и образуют новые, в том числе и токсичные соединения. В результате сложных фотохимических процессов в атмосфере, стимулируемых ультрафиолетовой радиацией солнца, из оксидов азота, углеводородов, альдегидов и других веществ образуются фотооксиданты (окислители). Низкие концентрации NO_2 могут создать большое количество атомарного кислорода, который, в свою очередь, образует озон и вновь реагирует с веществами, загрязняющими атмосферный воздух. Наличие в атмосфере формальдегида, высших альдегидов и других углеводородных соединений также способствует вместе с озоном образованию новых перекисных соединений. Продукты

диссоциации взаимодействуют с олефинами, образуя токсичные нитроперекисные соединения. При их концентрации более $0,2 \text{ мг/м}^3$ наступает конденсация водяных паров в виде мельчайших капелек тумана с токсичными свойствами. Их количество зависит от сезона года, времени суток и других факторов. В жаркую сухую погоду смог наблюдается в виде желтой пелены (цвет придает присутствующий в воздухе диоксид азота NO_2 , капельки желтой жидкости). Смог вызывает раздражение слизистых оболочек, особенно глаз, может вызвать головную боль, отеки, кровоизлияния, осложнения заболеваний дыхательных путей. Ухудшает видимость на дорогах, увеличивая тем самым количество дорожно-транспортных происшествий.

При постоянном воздействии выхлопных газов на организм могут развиваться иммунодефицит, бронхиты, страдают сосуды головного мозга, нервная система и другие органы. Формальдегиды и другие углеводороды в выхлопных газах дизельных двигателей, возможно, вызывают рак у людей при воздействии в течение года. Также рак легких был обнаружен у горнорабочих, которые подвергались действию выхлопных газов дизельных двигателей на протяжении 10–20 лет [4, 6].

В июне 2012 г. Всемирная организация здравоохранения (ВОЗ) классифицировала выхлопы от дизельных двигателей как канцерогенные. В соответствии с выводами ВОЗ воздействие $\text{PM}_{2.5}$ сокращает продолжительность жизни людей в среднем на 8,6 месяца [6, 7].

С ростом глубины горных работ возрастает концентрация техники на горизонтах, ухудшаются условия естественного проветривания рабочего пространства карьеров. На глубине карьеров более 200–250 м загрязнение воздуха вредными веществами на рабочих местах приводит к постепенному превышению предельно допустимых концентраций: по запыленности воздуха на рабочих местах в 3–5 раз, по оксидам углерода – в 1,5–3,0 раза, по оксидам азота – в 5–7 раз [8–11] – и не отвечает требованиям ГОСТ 12.1.005-88 «Воздух рабочей зоны». Это приводит к появлению профессиональных заболеваний, снижению производительности труда и производственному травматизму.

Воздействие выбросов дизельных двигателей на экономику предприятия

Превышение нормативов сказывается не только на человеческом факторе, но и на экономике предприятия, так как влечет за собой необходимость остановки карьера, ухудшение видимости на трассе, что также обуславливает частично или полностью приостановку работы оборудования.

При неблагоприятных метеоусловиях (НМУ – сочетание штилей с инверсиями) происходит лишь усугубление экологической ситуации, когда в соответствии с требованиями единых правил безопасности возникает необходимость прекращения производства горных работ. Продолжительность НМУ для карьеров Якутии, Восточной Сибири, северо-запада и Урала составляет соответственно 3500; 2720; 1650 и 1220 часов в год.

Например, по данным «Алроса», карьер «Удачный» по причине загазованности в 1988 г. простоял 145 часов, в 1989 – 1108, в 1990 – 1529, в 1991 – 1894, в 1992 – 2340, в 1993 – 1958, в 1994 – 1985, в 1995 – 2116, в 1996 – 1286, в 1997 – 1479, в 1998 году – 1302 часа (при средневзвешенной высоте подъема горной массы 200–450 м).

Эта проблема особенно актуальна для карьера «Юбилейный» (АК «Алроса»), глубина которого в 1999 г. достигла 110 м, а возможности естественного проветривания очень ограничены из-за низкой среднегодовой скорости ветра (3,5 м/с) и значительной продолжительности штилевого периода (11 %). Простои карьеров из-за загазованности иногда достигают 1500 часов в год. Увеличение глубины карьеров до 300–500 м увеличивает протяженность маршрута по серпантину до 5 км, что еще более усугубляет проблему загазованности и увеличивает простои. При этом на подъем руды автосамосвалами тратятся огромные энергоресурсы, так как мощность дизель-генераторов автосамосвалов достигает 2000 кВт и более. Все это вызывает потери производительности и, как следствие, экономический ущерб [11].

Изучение условий работы водителей карьерных самосвалов на Навоийском горно-металлургическом комбинате, горно-обогатительных комбинатах «Айхальский»,

«Юбилейный», «Удачный», «Ковдор» показало, что необходимо снижать выбросы выхлопных газов при работе двигателей на холостом ходу и при малых нагрузках [11–13].

Поэтому, даже несмотря на применение местных и индивидуальных средств защиты для операторов техники, работающей в карьере, процесс нередко останавливается именно по причине недостаточной видимости и невозможности безопасно проводить работы в карьере. Вследствие этого вопросы экологии атмосферы карьеров приобретают первостепенное значение.

Способы снижения экологической нагрузки

Снижение экологической нагрузки на окружающую среду имеет большое значение при разработке месторождений полезных ископаемых. Возрастающие во многих странах экологические нормы требуют радикального снижения объемов и токсичности выбросов отработавших газов. Снижение выбросов важно и для прилегающих к предприятиям муниципальных образований, потому что выбросы дизельной техники, включая сажевые частицы, или так называемый «черный углерод» (Black Carbon, BC), негативно сказываются на здоровье населения. Используя более «чистые» двигатели, компании избегают значительных экологических платежей, кроме того, существенно улучшаются собственно условия работы в карьерах, улучшается видимость, удастся снизить риски и количество аварий [14].

В октябре 2014 г. Европейская комиссия приняла «Директиву по качеству топлива», требующую от дистрибьюторов топлива для автомобильного транспорта сократить к 2020 г. на 6 % интенсивность выброса выхлопных газов [15].

При решении задач нормализации экологической ситуации в карьерах, прежде всего, нужно знать, сколько вредных веществ выбрасывается в атмосферу при работе автосамосвалов. Как показали исследования [11, 16, 17], их количество зависит от многих факторов: удельного расхода топлива на единицу транспортной работы, режима работы дизеля, грузоподъемности автосамосвалов, времени года и др. Статистика удельных выбросов вредных веществ приведена на примере автомобиля БелАЗ (табл. 2).

Таблица 2

Удельные выбросы вредных веществ дизельным двигателем автомобиля БелАЗ [18]

Самосвал	Грузо-подъемность, т	Двигатель	Мощность двигателя, кВт	Компонент	Значения удельных выбросов вредных веществ дизельными двигателями автомобилей, г/ч		
					холостой ход	50 % мощности	максимальная мощность
БелАЗ 75213	170	ЯМЗ 240ПМ2	1691	CO	874	1413	1961
				NO _x	642	4706	8605
				CH	214	427	804
				C	69	139	255
				Бензпирен	0,001	0,001	0,002
БелАЗ 7519	110	8ДМ-21А	956	CO	494	1081	1108
				NO _x	363	2660	4876
				CH	121	242	443
				C	23	79	144
				Бензпирен	0,002	0,002	0,002
БелАЗ 7549	80	6ДМ21А	772	CO	370	488	895
				NO _x	254	2148	3938
				CH	98	195	358
				C	17	53	116
				Бензпирен	0,002	0,002	0,002
Дизель-троллейвоз на базе БелАЗ 7519	110	6ДМ-21А	603	CO	350	834	1053
				NO _x	239	2280	3914
				CH	114	213	330
				C	13	60	104
				Бензпирен	0,002	0,002	0,002

Нормализация атмосферы в карьерах с автотранспортом может быть достигнута несколькими путями:

- проветриванием естественным (в основном на нагорных карьерах) и искусственным с помощью стационарных и передвижных вентиляторных установок;

- эксплуатацией малотоксичных дизелей;

- разработкой новых, экологически более чистых конструкций двигателей;

- снижением расхода топлива на транспортирование горной массы;

- применением специальных присадок к топливу, снижающих выбросы сажи в атмосферу;

- применением нейтрализаторов отработанных газов, устанавливаемых на машинах непосредственно за дизелем;

- применением альтернативных видов топлива и энергии.

Обширные исследования, проведенные в направлении нормализации атмосферы карьеров [19–22], показали, что затраты на проветривание карьеров значительны, требуют создания технически сложных и дорогостоящих вентиляционных установок, значительной энергии затрат и, как правило, экономически не оправданы. Затраты на нагнетание чистого

воздуха в карьер, необходимого для проветривания, зачастую перекрывают расход топлива карьерных самосвалов даже при условии, что экскаваторы в забое запитаны от кабеля – сети переменного или постоянного тока.

В последние годы были проведены различные исследования для улучшения процесса сгорания и экономии топлива дизельных двигателей карьерных самосвалов. Усовершенствованная система управления температурным режимом работы двигателя позволяет уменьшить расход топлива, выбросы загрязняющих веществ, время прогрева, а также повысить общую производительность двигателя. Тем не менее до 30 % топлива расходуется на энергию, рассеиваемую в окружающем пространстве [23].

Другим способом снижения выбросов токсичных веществ является применение на двигателях устройства и системы по обезвреживанию выхлопных газов, в том числе нейтрализаторов. В то же время стоит отметить, что карьерные автосамосвалы, применяемые на открытых горных работах, не оборудованы нейтрализаторами. В случае же установки нейтрализаторов на дизели они эффективно работают лишь при температуре отработавших газов выше 300 °С; а в зимних условиях,

особенно в северных районах, отработавшие газы быстро охлаждаются, что резко снижает степень их очистки [24]. В результате исследований уровня выхлопных газов, выделяемых самосвалами БелАЗ на разрезах угольных компаний Кузбасса (Кедровский, Бачатский, Листвянский, Ольжерасский и Томусинский), было установлено [24], что восстановительные катализаторы с использованием родия имеют низкий срок службы. При неисправной топливной аппаратуре и двигателе нейтрализаторы через несколько часов работы выходят из строя. При этом высокая температура блока носителя приводит к переходу NO_x в более высокие оксиды, а значит, еще большей опасности для человека и окружающей среды при выбросе таких газов в атмосферу. Кроме того, нейтрализаторы создают повышенное сопротивление движению отработавших газов, снижают мощность двигателя, поэтому водителю часто приходится форсировать обороты дизеля, увеличивая тем самым потребление дизтоплива, а значит, и выбросы опасных веществ в атмосферу.

Одной из основных задач дальнейшего развития автомобильного карьерного транспорта следует считать создание принципиально новых бездымных типов двигателей и видов топлива. Основные разработки сейчас ориентированы на повышение надежности агрегатов, внедрение более прогрессивных силовых установок, в том числе электрических двигателей с частотным и импульсным регулированием, более экономичных и экологически более чистых дизельных двигателей.

Сегодня большую долю на карьерах составляют импортные самосвалы, топливная аппаратура которых оборудована по европейским стандартам, что позволяет им оказывать меньшее негативное воздействие на экологию региона. Например, самосвал CAT-785C, введенный в эксплуатацию в ОАО «Лебединский ГОК» в 2006 г., с первых месяцев показал преимущества в работе перед автосамосвалом БелАЗ 7513, имеющим практически ту же грузоподъемность. Грузооборот превысил аналогичный показатель на 32 %, удельный расход топлива оказался ниже на 25 % в тех же условиях. Выше оказались показатели надежности, коэффициент технической готовности, долговечность и экологические характеристики [25].

Однако в настоящее время самосвалы БелАЗ комплектуются импортными двигателями и по экологическим характеристикам практически не отличаются от зарубежных аналогов [26] (табл. 3).

Главной особенностью новых карьерных самосвалов Caterpillar Cat 773G и Cat 775G, по сравнению с ранее выпускавшимися моделями, является использование двигателя, сертифицированного в соответствии с требованиями новейшего экологического стандарта US EPA Tier 4 Final. Это первые карьерные самосвалы с такими высокими экологическими характеристиками. На обеих моделях внедрены технология повышения эффективности сгорания топлива ACERT, система нейтрализации оксидов азота, каталитический нейтрализатор выхлопных газов и многоступенчатые фильтры. Для России самосвалы комплектуются двигателем уровня Tier 2 или EU Stage II. Каждый из них

Таблица 3

Экологические характеристики карьерных самосвалов

Самосвал	Грузоподъемность, т	Двигатель	Мощность двигателя, кВт	Значения удельных выбросов вредных веществ дизельными двигателями автомобилей, г/ч			
				CO	NMHC + NO _x	NO _x	сажа
Howo ZZ5707S3840AJ	50	WD615.47T2	271	3,5	6,6	–	0,20
БелАЗ-7555F	55	Cummins QSK 19-C	522	3,5	6,4	–	0,20
БелАЗ-7555E	60	Cummins QSK 19-C	559	11,4	1,3	9,2	0,54
БелАЗ-7555I	60	Liebherr D 9512	565	3,5	6,4	–	0,20
Komatsu HD785-5	91	SA12V140	753	3,5	6,4	–	0,20
Caterpillar Cat 773G	96,4	Cat C27 ACERT	547	3,5	6,4	–	0,20
Komatsu HD1500-7	141,1	Komatsu SDA12V160	1048	11,4	7,4	9,2	0,50
Hitachi EH3500AC-3	181	Cummins QSKTA50-CE	1491	14,1	8,4	9,2	0,50
Liebherr T262	218	Cummins QSK60	1492	14,1	8,4	–	0,50

снабжен системой управления трансмиссией (APES), снижающей расход топлива при различных режимах движения [27].

Достаточно простым и результативным решением проблемы снижения выбросов токсичных компонентов в отработанных газах двигателя является использование усовершенствованных дизельных двигателей с малотоксичными рабочими процессами, а также расширение базы энергоресурсов как один из способов уменьшения техногенного влияния на окружающую среду.

Одним из вариантов повышения эффективности и экологичности автомобильного транспорта в карьерах является использование самосвалов в составе карьерных автопоездов [28].

Практический опыт показывает, что одним из перспективных направлений решения проблемы расширения базы энергоресурсов для транспортных средств является применение газообразного топлива (природный, сжатый, сжиженный). Выбросы загрязняющих веществ у двигателей, использующих в качестве топлива природный газ, по наиболее вредным компонентам в 2–5 раз менее опасны, чем у дизелей. Применение топлива из природного газа позволяет почти в 10 раз сократить дымность отработавших газов, снизить удельные выбросы (на один самосвал) по CO в 2–3 раза, NO_x – 1,3–1,4 раза, по твердым частицам – в 4–5 раз, а образование сажи, свойственное дизельным двигателям, отсутствует [17, 29–31].

Еще одним перспективным направлением является использование двигателей других принципиальных решений и типов (газотурбинных или электродвигателей с автономным питанием от специальных источников).

Троллейвоз – экологичный вид карьерного транспорта

Доля загрязнения воздушной среды в значительной мере определяется используемым видом транспорта (рис. 1) и режимом его работы [32, 33].

Одной из самых больших статей расхода при горных работах является энергия, необходимая для добычи и переработки минеральных руд. Этот спрос на энергию обычно удовлетворяется за счет дизельного топлива или электроэнергии. До 70–80 % общего объема топлива потребляют нагруженные самосвалы на подъемах. Учитывая постоянно возрастающую стоимость дизельного топлива (рис. 2), используемого карьерными самосвалами, можно прогнозировать, что в обозримом будущем доля затрат на горючее в себестоимости транспортирования горной массы увеличится в среднем в 1,5–2,0 раза.

Обычно скорость самосвала на уклоне ограничена мощностью дизельного двигателя. Если один и тот же самосвал может получить больше энергии, то он может поддерживать более высокую скорость. В этой связи следует отметить возможности дизель-троллейвозного и троллейвозного транспорта [1, 9, 10, 32–35].

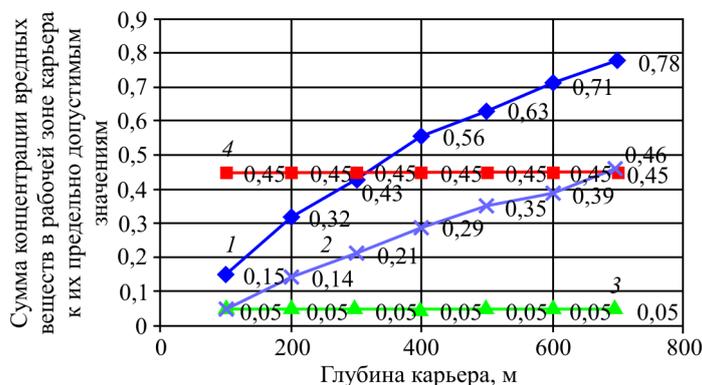


Рис. 1. Изменение суммы концентрации вредных веществ в рабочей зоне карьера к их предельно допустимым значениям для различных видов транспортных машин при изменении глубины карьера [9]: 1 – дизельный автомобильный транспорт; 2 – дизель-троллейвозный транспорт; 3 – конвейерный транспорт; 4 – максимальная допустимая концентрация

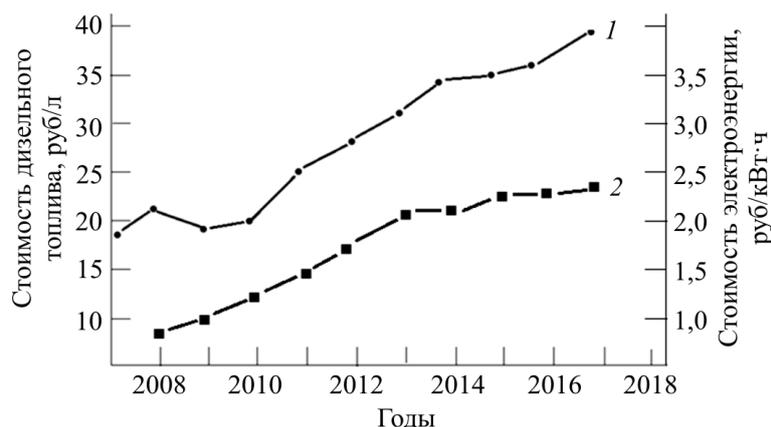


Рис. 2. Динамика стоимости дизельного топлива (1) и электроэнергии (2) в России (по данным Росстата)

При использовании электроприводов большая мощность, подаваемая на колесные двигатели, позволяет самосвалам двигаться быстрее на подъемах, что приводит к сокращению времени рабочего цикла и повышению производительности при добыче полезных ископаемых.

Если самосвал используется в режиме троллейвоза, двигатель работает на холостом ходу и расход топлива существенно уменьшается (табл. 4), что снижает шум и объем выбросов в окружающую среду.

Таблица 4

Сравнение карьерного самосвала Komatsu 730E грузоподъемностью 190 т, работающего в разных режимах [36]

Параметр	Дизельный режим	Троллейный режим
Скорость, км/ч	12,2	23,7
Использование топлива, л/ч	367	37,4
Использование электроэнергии, кВт	0	1930
Стоимость топлива (1,05 долл/л)	385,35	39,27
Стоимость электроэнергии (0,07 долл/(кВт·ч))	–	135,10
Общая стоимость (долл/ч)	385,35	174,37

За последние 20 лет были достигнуты значительные успехи в технологии производства самосвалов с электроприводом. Приводные системы этих самосвалов состоят из двух электромоторов, которые интегрированы через шестерни в задние колеса самосвала, электрический генератор и мощный дизельный двигатель.

Электроэнергию можно получать от электрогенератора дизельного двигателя на

самосвале или из выделенной подстанции и через подвесную контактную сеть непосредственно на двигатель карьерного самосвала.

Карьерные самосвалы с электроприводом, оснащенные токоприемниками, могут получать энергию от воздушной контактной сети. Троллейные системы, которые заменяют дизельное топливо на электричество, могут предложить еще один путь для дальнейшего развития карьерного транспорта.

В настоящее время общее количество внедренных проектов троллейзации карьерного транспорта относительно невелико и, к сожалению, большинство из них – за рубежом [1].

В странах Африки, в Бразилии, США и Европе давно и успешно эксплуатируется система транспорта с применением дизель-троллейвозов. В карьерах Sishen (ЮАР) с января 1981 г. на участке 2 км начали работать 55 троллейвозов, а с октября 1981 г. в ЮАР было открыто движение троллейвозов Unit Rig Lectra Haul M200eT в Пхалаборве (Phalaborwa), обслуживающих участок 8 км. С 1986 г. троллейвозы на рудниках и карьерах используются в Конго (карьер Lubembashi), Намибии (бассейн Россинга – Rossing – в пустыне Намиб), на медных рудниках Гега вблизи Лубумбаши в Заире. Особенно показателен пример золоторудного карьера «Бетце» (США, шт. Невада), где для транспортирования 410 тыс. т горной массы в сутки используется парк из 73 дизель-троллейвозов грузоподъемностью 170 т.

Троллейвозы успешно работают на угольных разрезах Grootegeluk в Южной

Африке [36] и Grivice в RMU Vanovici в Боснии и Герцеговине [37]. Для перевозки угля используются карьерные самосвалы-троллейбусы грузоподъемностью 254 т типа Euclid-Hitachi EH4500 AC.

Троллейная система может устанавливаться на любом участке подъема между погрузочной площадкой (карьером) и точками разгрузки (отвалом или технологической установкой).

При добыче полезных ископаемых к подвесной контактной сети предъявляются требования, аналогичные тяговым приводам на легкой железнодорожной инфраструктуре: механическая стабильность, надежность в эксплуатации и низкие эксплуатационные расходы. Инфраструктура троллейвозного комплекса включает в себя систему контактных сетей, тяговые подстанции, мачты линий высокого напряжения, освещение системы провеса и токоприемник карьерного самосвала [34–39]. Техника безопасности при эксплуатации и обслуживании электрифицированного колесного карьерного автотранспорта и железнодорожного карьерного автотранспорта аналогична.

Самосвалы работают как в рабочем, так и тормозном режимах. Основным энергетическим преимуществом троллейвоза по сравнению с самосвалом, имеющим традиционную электромеханическую трансмиссию, является возможность рекуперации в сеть кинетической энергии, выделяющейся при торможении, и потенциальной энергии при движении под уклон. В этом случае используется одна троллейная линия в грузовом направлении, а для привода троллейвоза в порожнем направлении применяется накопитель-аккумулятор энергии, который накапливает энергию за счет рекуперации энергии торможения в порожнем направлении и дополнительно может подзаряжаться от троллейной линии.

Рекуперация энергии торможения является одним из наиболее перспективных источников экономии энергии. Принципиальное условие реализуемости рекуперации энергии – возможность изменения направления потока энергии между питающей сетью и тяговыми двигателями. Это может быть достигнуто только при определенных конструктивных особенностях преобразовательного агрегата, питающего тяговые двигатели. Основными

преимуществами от обратимых подстанций являются [34–39]:

- рекуперация энергии торможения в любое время с сохранением при этом приоритета естественного обмена энергией между самосвалами;

- регулирование выходного напряжения постоянного тока;

- снижение уровня гармоник и повышения коэффициента мощности на стороне переменного тока.

На основе анализа работы дизель-троллейбусов было отмечено [34–39], что нагруженный самосвал на пути в 1 км, спускаясь по уклону, восстанавливает около 7900 кВтч энергии в сутки (работа – 20 ч, 5 мин загрузки). При стоимости электроэнергии 0,077 долл. за киловатт-час стоимость энергии рекуперации в день на грузовике составляет 608 долл. При движении порожнего самосвала по аналогичному профилю стоимость рекуперации энергии в день на самосвал составляет 262 долл. Экономия будет тем значительнее, чем длиннее уклон и больше размер автопарка.

В то же время дизель-троллейбусам присущи определенные недостатки:

- повышенные требования к конструкции и качеству дорожного покрытия;

- необходимость дополнительных затрат на создание и поддержание разветвленной контактной сети;

- увеличение стоимости дизель-троллейвоза на 5–10 % по сравнению с серийными самосвалами с электроприводом;

- увеличение массы дизель-троллейвоза в сравнении с дизель-электрическим самосвалом за счет установки троллейного оборудования.

Первоначально задача создания электрифицированного транспорта решалась путем установки дополнительного электродвигателя на карьерный самосвал, т.е. экспериментальные образцы были построены на базе машин, спроектированных с расчетом использования в качестве силового агрегата дизельного двигателя, например БелАЗ 75195 и другие более поздние модели. Поэтому электродвигатель не был способен продемонстрировать в полной мере все преимущества перед дизелем. В настоящее время сразу проектируют машину из расчета

применения выбранного электрического силового агрегата, чтобы максимально использовать все преимущества электродвигателя [40].

Троллейвоз (или троллейно-аккумуляторный самосвал) имеет дополнительные преимущества:

- значительно более высокий КПД электродвигателя по сравнению с дизельным;
- тепловые потери энергии в 3 раза меньше, чем у дизельного двигателя такой же мощности;
- исключение дизельного выхлопа и, следовательно, отсутствие загазованности карьера и образования тумана, т.е. значительное улучшение экологической ситуации;
- исключение затрат на закупку, хранение и транспортировку дизельного топлива;
- уменьшение стоимости самосвала за счет исключения дизельного двигателя;
- уменьшение затрат на шины из-за меньшей собственной массы троллейвоза, особенно в случаях, когда троллейвозы используются практически на горизонтальной дороге;
- легкость в обслуживании силового агрегата;
- невосприимчивость электродвигателя к морозам, что особенно выгодно отличает его в северных регионах от дизеля (сильные отрицательные температуры оказывают негативное влияние в основном на аккумуляторы).

Длинные перегоны и более крутые склоны дают возможность для проявления всех достоинств троллейвоза при перевозе грузов.

В то же время у троллейвоза имеются недостатки как общие с дизель-троллейвозами, так и собственные [41]:

- питание двигателя от воздушной контактной сети;
- необходимость дополнительных затрат на создание и поддержание разветвленной контактной сети;
- повышенные требования к конструкции и качеству дорожного покрытия;
- малая маневренность;
- затрудненность процессов погрузки и разгрузки.

Необходимость в питании от контактной сети является самым серьезным недостатком троллейвоза. Для обеспечения его работы требуется проложить троллейную трассу, к тому же, ввиду роста карьера по мере выработки полезного ископаемого, трассу необходимо будет время от времени

перемещать и дополнять новыми участками. Трасса должна быть обеспечена необходимым количеством тяговых подстанций и основным источником питания сети, а также 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 задеть.

Для повышения маневренности самосвала можно использовать дополнительный силовой агрегат – дизель или газодизель. Установка дополнительного силового агрегата, например дизельного двигателя, чревата увеличением массы машины, стоимости обслуживания, выбросов продуктов горения топлива в атмосферу. В случае газодизеля выброс токсичных продуктов горения топлива значительно меньше.

Радикальным вариантом может быть применение контактно-аккумуляторных самосвалов, движение которых в глубинной части карьеров и в забоях будет осуществляться с помощью аккумуляторных батарей, а при выезде из карьера – с помощью контактной сети. Аккумуляторы незначительно, по сравнению с двигателями внутреннего сгорания, увеличивают массу самосвала.

Например, китайский концерн BYD Co. разработал новый самосвал BYD V60 с колесной формулой 6×4. Трехосный карьерный самосвал полной массой 60 т и габаритной шириной 3,2 м рассчитан для работы в угольных разрезах, а также плохо продуваемых карьерах. Грузоподъемность машины составляет лишь 30 т из-за огромной снаряженной массы в 30 т. Только на автомобильный аккумулятор и тяговые электродвигатели приходится 10 т. Полезный объем кузова составляет 30 м³. Лучшим вариантом является самосвал Komatsu HD 605-7 (рис. 3) грузоподъемностью 65 т, электромоторы которого питаются от аккумуляторных батарей общей емкостью 700 кВт ч, и весом 4,5 т. Самосвал оборудован системой рекуперативного торможения, которая за короткую поездку способна подзарядить батарею на 40 кВт ч. Эти электросамосвалы работают на цементном карьере возле горы Шассераль в Швейцарии с конца 2017 г.

К недостаткам аккумуляторов можно отнести непродолжительный срок эксплуатации,



Рис. 3. Троллейвоз
(аккумуляторный электросамосвал)
Komatsu HD 605-7

небольшой запас хода в сравнении с двигателем внутреннего сгорания и высокую стоимость самих аккумуляторных блоков.

Возможность использования большей мощности позволяет троллейвозу двигаться с большей скоростью и преодолевать более крутые уклоны (до 100–120 ‰), что обеспечивает повышение производительности.

Повышение эффективности работы горного предприятия может достигаться за счет значительной экономии топлива, повышения производительности процесса транспортирования горной массы, сокращения автопарка, уменьшения расходов на эксплуатацию и техническое обслуживание.

Например, если время рабочего цикла уменьшается на 20 % в результате увеличения скорости на подъемах, то парк из 32 самосвалов-троллейвозов способен обеспечить те же результаты, что и 40 самосвалов, работающих на дизельном топливе [36–39].

Затраты на эксплуатацию и техническое обслуживание двигателя напрямую связаны с часами работы самосвалов. Использование электродвигателя, запитанного от воздушной контактной сети при движении на подъеме, уменьшает время работы дизельного двигателя, тем самым увеличивая межремонтные интервалы. При движении по уклону во время спуска снижаются затраты на потребляемую энергию за счет регенерации и возвращения ее в сеть.

При использовании дизель-троллейвозов обеспечивается сокращение времени движения на 16 %, экономия топлива 60–85 % при каждом цикле вверх-вниз, снижение объема вредных выбросов в атмосферу в 1,7–2,0 раза, и

только содержание пыли останется прежним [36–40, 42].

Решающую роль при оценке эффективности применения дизель-троллейвозов играет соотношение цен на дизельное топливо и электроэнергию (см. рис. 2). Расчеты, технико-экономические обоснования и практика показывают, что троллейная система окупается за 2–4 года [1, 36–39, 42].

Анализ опыта использования дизель-троллейвозов в Северной Америке, Африке и Европе свидетельствует о перспективности этого вида карьерного транспорта. Так, например, ОАО «БелАЗ», планирует выпуск дизель-троллейвозов грузоподъемностью 220–240 и 320–360 т [40].

Выводы

Экологическая ситуация в карьерах во многом зависит от конструктивного совершенства транспортных машин, особенно дизелей. Рост объемов производства также способствует увеличению потребления энергии и выбросов выхлопных газов. Выхлопные газы дизелей в силу большого количества и высокой токсичности оказывают чрезвычайно опасное воздействие на здоровье людей и окружающую среду. В условиях повышения энергоэффективности предприятий, постоянно возрастающих экологических требований к снижению токсичности выхлопных газов назревает необходимость перевода карьерного автотранспорта на другие виды энергии.

Дизель-троллейвозы обладают более высокими, чем самосвалы, скоростями движения на горизонтальных участках и на подъем при питании от контактной сети. При использовании дизель-троллейвозов обеспечивается сокращение расхода топлива на 50–60 %, снижение объема вредных выбросов в атмосферу в 1,7–2,0 раза, повышение производительности автотранспорта на 40–50 % и снижение эксплуатационных расходов на 15–20 % по сравнению с дизельными самосвалами. Кроме того, обеспечивается рекуперация энергии при движении самосвала под уклон.

Троллейвозы выгодны для горных предприятий, географически расположенных в районах, где имеется большая разница между

затратами на дизельное топливо и стоимостью электроэнергии. Карьерные троллейбусы лучше использовать только на долгосрочных

разработках, поскольку содержание контактной сети троллейных линий требует ухода и обслуживания.

Библиографический список

1. Галкин В.И., Шешко Е.Е. Проблемы совершенствования транспортных систем в горной промышленности России // Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал). – 2011. – № 1. – С. 485–507.
2. «БелАЗ» увеличил экспорт в Россию на 65 % [Электронный ресурс]. – URL: <https://rg.ru/2018/03/05/belaz-uvelichil-eksport-v-rossiiu-na-65-procentov.html> (дата обращения: 12.03.2018).
3. Анистратов К.Ю. Мировые тенденции развития структуры парка карьерной техники // Горная промышленность. – 2011. – № 6. – С. 22–26.
4. 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.
5. Чернецов Д.А. Токсичность отработавших газов дизелей и их антропогенное воздействие // Вопросы современной науки и практики. Университет им. В.И. Вернадского. – 2010. – № 10–12. – С. 54–59.
6. 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
7. 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
8. Шешко О.Е. Эколого-экономическое обоснование возможности снижения нагрузки на природную среду от карьерного транспорта // Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2017. – № 2. – С. 241–252.
9. Шешко О.Е. Эколого-экономическая оценка карьерных транспортных машин нового поколения // Научный вестник Московского государственного горного университета. – 2013. – № 12. – С. 281–288.
10. Шешко О.Е. Эколого-экономическое сравнение применения в глубоких карьерах дизель-троллейбусов и циклично-поточной технологии // Научный вестник Московского государственного горного университета. – 2013. – № 5. – С. 108–116.
11. Сокращение загазованности карьерного пространства при применении новых видов карьерного транспорта / П.И. Тарасов, А.Г. Журавлев, Е.В. Фелелов [и др.] // Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал). – 2008. – № 2. – С. 260–271.
12. Кутенев В.Ф., Сайкин А.М. Исследование влияния условий эксплуатации карьерных самосвалов на загрязнение воздуха кабин водителей // Журнал автомобильных инженеров. – 2009. – № 4 (57). – С. 17–19.
13. Кулешов А.Н., Андреев Л.Н. Влияние параметров микроклимата салонов грузовых автомобилей на условия труда и методы его улучшения // Современные тенденции развития науки и технологий. – 2016. – С. 68–72.
14. Холод Н.М., Малышев В.С., Эванс М. Снижение выбросов черного углерода карьерными самосвалами // Горная промышленность. – 2015. – № 3 (121). – С. 72–76.
15. Climate action: Reducing the carbon content of transport fuels, Press release / European Commission, Brussels, 2014 [Электронный ресурс]. – URL: http://europa.eu/rapid/press-release_IP-14-1095_en.htm (дата обращения: 12.02.2018).
16. Soofastaei A., Aminossadat S.M., Kizil M.S., Payload variance plays a critical role in the fuel consumption of mining haul trucks // Aust Resour Invest. – 2014. – Vol. 8, № 4. – P. 64–64.
17. 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
18. Методика расчета вредных выбросов (сбросов) и оценки экологического ущерба при эксплуатации различных видов карьерного транспорта. – М.: Ин-т горн. дела им. А.А. Скочинского, 1994. – 52 с.
19. Морин А.С. Трубопроводная вентиляция на карьерах // Горная промышленность. – 2002. – № 3. – С. 40–43.
20. Старостин И.И., Бондаренко А.В. Проветривание карьеров струйными вентиляторами в комплексе с устройством для аэрации // Наука и образование: научное издание МГТУ им. Н.Э. Баумана. – 2015. – № 1. – С. 32–41.
21. Козырев С.А., Амосов П.В. Пути нормализации атмосферы глубоких карьеров // Вестник Мурманского государственного технического университета. – 2014. – Т. 17, № 2. – С. 231–237.
22. The characteristics of greenhouse gas emissions from heavy-duty trucks in the Beijing-Tianjin-Hebei (BTH) region in China / Y. Xing, H. Song, M. Yu [et al.] // Atmosphere. – 2016. – Vol. 7, № 9. – P. 121–132. DOI: 10.3390/atmos7090121
23. 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: 10.4028/www.scientific.net/AMR.813.273

24. Хороший опыт лучше поучений / С. Протасов, А. Березин, А. Подгорный [и др.] // Уголь Кузбасса. – 2017. – № 4. – С. 104–106.

25. Дронов Н.Н., Ефремов Ю.И., Беклемищев А.Н. Опыт работы карьера Лебединского ГОКА: гигантские масштабы, оригинальные технологии, перспективы развития // Горный журнал. – 2009. – № 11. – С. 88–91.

26. Степук О.Г., Семко С.Н., Зуёнок А.С. Большегрузные карьерные самосвалы и машины повышенной проходимости – серийная продукция предприятия сегодня // Горный журнал. – 2013. – № 1. – С. 30–41.

27. Пополнение карьерной флоры [Электронный ресурс] // Автомобильные дороги. – 2014. – № 4(989). – URL: <http://www.avtodorogi-magazine.ru/item/194-popolnenie-karernoj-pleyady.html> (дата обращения: 12.02.2018).

28. 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. 45–48.

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

30. Бойченко С.В., Шкильнюк И.А. Экологические аспекты использования моторных топлив (обзор) // Энерготехнологии и ресурсосбережение. – 2014. – № 5–6. – С. 35–44.

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

32. Тарасов П.И., Тарасов А.П. Технологические особенности и перспективы применения троллейбусов на горных предприятиях // Горная промышленность. – 2008. – № 1. – С. 54–62.

33. 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 on. – 2016. – P. 1–6. DOI: 10.1109/MESA.2016.7587102

34. Lajunen A. Energy efficiency of conventional, hybrid electric, and fuel cell hybrid powertrains in heavy machinery. – SAE Technical Paper, 2015. – DOI: 10.4271/2015-01-2829

35. Esfahanian E., Meech J.A. Hybrid electric haulage trucks for open pit mining // IFAC Proceedings Volumes. – 2013. – Vol. 46, № 16. – P. 104–109. DOI: 10.3182/20130825-4-US-2038.00042

36. Mazumdar J. All electric operation of ultraclass mining haul trucks // Industry Applications Society Annual Meeting, 2013 IEEE. 2013. P. 1–5. DOI: 10.1109/IAS.2013.6682568.

37. Nurić S., Nurić A., Brčanić 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.

38. Varaschin J., De Souza E. Economics of diesel fleet replacement by electric mining equipment // 15th North American Mine Ventilation Symposium. – 2015. – 8 p.

39. Development of mining machinery and future outlook for electrification / K. Uno, K. Imaie, K. Maekawa, G. Smith, A. Suyama, J. Hatori // Hitachi Review. – 2013. – Vol. 62, № 2. – P. 100–112.

40. Степук О.Г., Зуёнок А.С. Дизель-троллейбусный транспорт БелАЗ: перспективы использования в горном производстве // Горный журнал. – 2013. – № 1. – С. 52–55.

41. Хазин М.Л., Штыков С.О. Причины, затрудняющие применение троллейбусов в горной промышленности // Технологическое оборудование для горной и нефтегазовой промышленности. – 2017. – С. 380–382.

42. Cruzat J.V., Valenzuela M.A. Modeling and evaluation of benefits of trolley assist system for mining trucks // Industry Applications Society Annual Meeting, 2017 IEEE. – 2017. – P. 1-10. DOI: 10.1109/IAS.2017.8101840

References

1. Galkin V.I., Sheshko E.E. Problemy sovshhenstvovaniia transportnykh sistem v gornoi promyshlennosti Rossii [Problems of improvement of transport systems in the mining industry of Russia]. *Gornyi informatsionno-analiticheskii biulleten (nauchno-tekhnicheskii zhurnal)*, 2011, no.1, pp.485-507.

2. “BelAZ” uvelichil eksport v Rossiiu na 65 %, available at: <https://rg.ru/2018/03/05/belaz-uvlichil-eksport-v-rossiiu-na-65-procentov.html> (accessed 12 March 2018).

3. Anistratov K.Iu. mirovye tendentsii razvitiia struktury parka karernoj tekhniki [World trends in the development of the park's career structure]. *Gornaia promyshlennost*, 2011, no.6, pp.22-26.

4. 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.

5. Chernetsov D.A. Toksichnost otrabotavshikh gazov dizelei i ikh antropogennoe vozdeistvie [Toxicity of exhaust gases of diesel engines and their anthropogenic impact]. *Voprosy sovremennoi nauki i praktiki. Universitet im V.I. Vernadskogo*, 2010, no.10-12, pp.54-59.

6. Thiruvengadam A., Besch M., Carder D., Oshinuga A. Unregulated 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

7. 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

8. 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 natural environment from quarry transport]. *Gornyi informatsionno-analiticheskii biulleten*, 2017, no.2, pp.241-252.

9. Sheshko O.E. Ekologo-ekonomicheskaya otsenka karernykh transportnykh mashin novogo pokoleniia [Ecological and economic assessment of new generation of career transport vehicles]. *Nauchnyi vestnik moskovskogo gosudarstvennogo gornogo universiteta*, 2013, no.12, pp.281-288.

10. Sheshko O.E. Ekologo-ekonomicheskoe sravnenie primeniia v glubokikh karerakh dizel-trolleivozov i tsiklichno-potochnoi tekhnologii [Ecological-economic comparison of application in deep quarries of diesel-trolleybus and cyclic-flow technology]. *Nauchnyi vestnik Moskovskogo gosudarstvennogo gornogo universiteta*, 2013, no.5, pp.108-116.

11. Tarasov P.I., Zhuravlev A.G., Fefelov E.V. et al. Sokrashchenie zagazovannosti karernogo prostranstva pri primeniia novykh vidov karernogo transporta [Reduced gassing of the quarry space when applying new types of quarry transport]. *Gornyi informatsionno-analiticheskii biulleten (nauchno-tekhnicheskii zhurnal)*, 2008, no.2, pp.260-271.

12. Kutenev V.F., Saikin A.M. Issledovanie vliianiia uslovii ekspluatatsii karernykh samosvalov na zagriaznenie vozdukh kabin voditelei [Investigation of the influence of the conditions of the operation of the quarry dump trucks on the air pollution of the booths of drivers]. *Zhurnal avtomobilnykh inzhenerov*, 2009, no.4 (57), pp.17-19.

13. Kuleshov A.N., Andreev L.N. Vliianie parametrov mikroklimate salonov gruzovykh avtomobilei na usloviia truda i metody ego uluchsheniia [Influence of parameters of microclimate of lorries' salons on working conditions and methods of its improvement]. *Sovremennye tendentsii razvitiia nauki i tekhnologii*, 2016, pp.68-72.

14. Kholod N.M., Malyshev V.S., Evans M. Snizhenie vybrosov chernogo ugleroda karernymi samosvalami [Reduction of black carbon emissions by dump trucks]. *Gornaia promyshlennost*, 2015, no.3 (121), pp.72-76.

15. Climate action: Reducing the carbon content of transport fuels, Press release, European Commission, Brussels, 2014, available at: http://europa.eu/rapid/press-release_IP-14-1095_en.htm (accessed 12 February 2018).

16. Soofastaei A., Aminossadat S.M., Kizil M.S. Payload variance plays a critical role in the fuel consumption of mining haul trucks. *Aust Resour Invest.*, 2014, vol.8, no.4, pp.64-64.

17. 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

18. Metodika rascheta vrednykh vybrosov sbrosov i otsenki ekologicheskogo ushcherba pri ekspluatatsii razlichnykh vidov karernogo transporta [Method of calculation of harmful emissions (discharges) and estimation of ecological damage at operation of various kinds of crank transport]. Moscow, Institut Gornogo dela imeni A.A. Skochinskogo, 1994, 52 p.

19. Morin A.S. Truboprovodnaia ventiliatsiia na karerakh [Pipeline ventilation in quarries]. *Gornaia promyshlennost*, 2002, no.3, pp.40-43.

20. Starostin I.I., Bondarenko A.V. Provetrivanie karerov struinymi ventilatorami v komplekse s ustroistvom dlia aeratsii [Venting quarries with jet blowers in combination with aeration device]. *Nauka i obrazovanie: nauchnoe izdanie MGTU im. N.E. Baumana*, 2015, no.1, pp.32-41.

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

22. Xing Y., Song H., Yu M. et al. The characteristics of greenhouse gas emissions from heavy-duty trucks in the Beijing-Tianjin-Hebei (BTH) region in China. *Atmosphere*, 2016, vol.7, no.9, pp.121-132. DOI: 10.3390/atmos7090121

23. 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: 10.4028/www.scientific.net/AMR.813.273

24. Protasov S., Berezin A., Podgornyi A. et al. Khoroshii opyt luchshe pouchenii [Good experience is better than teaching]. *Ugol Kuzbassa*, 2017, no.4, pp.104-106.

25. Dronov N.N., Efremov I.U., Beklemishchev A.N. Opyt raboty karera Lebedinskogo GOKA: gigantskie masshtaby, originalnye tekhnologii, perspektivy razvitiia [Experience of Lebedinsky GOKA career: gigantic scales, original technologies, prospects for development]. *Gornyi zhurnal*, 2009, no.11, pp.88-91.

26. Stepuk O.G., Semko S.N., Zuenok A.S. Bolshegruznye karernye samosvaly i mashiny povyshennoi prokhodimosti – seriinaia produktsiia predpriiatiia segodnia [The bulky dump trucks and high-throughput cars are serial products of the enterprise today]. *Gornyi zhurnal*, 2013, no.1, pp.30-41.

27. Popolnenie karernoi pleiady [Replenishment of a career galaxy]. *Avtomobilnye dorogi*, 2014, no.4(989), available at: <http://www.avtodorogi-magazine.ru/item/194-popolnenie-karernoj-pleiady.html> (accessed 12 February 2018).

28. Tarasov P.I., Zyrianov I.V., Kondratiuk A.P., Khazin M.L. Avtopoezda – novaia tekhnika dlia effektivnogo osvoeniia kimberlitovykh mestorozhdenii Respubliki Sakha (Iakutiia) [Traction – a new technique for the effective development of kimberlite deposits of the Republic of Sakha (Yakutia)]. *Gornaia promyshlennost*, 2016, no.5. (129), pp.45-48.

29. Song H., Ou X., Yuan J. Wang C. Energy consumption and greenhouse gas emissions of diesel/LNG heavy-duty vehicle fleets in China based on a bottom-up model analysis. *Energy*, 2017, vol.140, pp.966-978. DOI: 10.1016/j.energy.2017.09.011.
30. Boichenko S.V., Shkilniuk I.A. Ekologicheskie aspekty ispolzovaniia motornykh topliv (obzor) [Environmental aspects of the use of motor fuels (review)]. *Energotekhnologii i resursoberezhenie*, 2014, no.5-6, pp.35-44.
31. 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 a quarry road vehicle for the North]. *Gornaia promyshlennost*, 2016, no.6, pp.51-61.
32. Tarasov P.I., Tarasov A.P. Tekhnologicheskie osobennosti i perspektivy primeneniia trolleivozov na gornykh predpriiatiakh [Technological features and prospects of the use of trolleys in mining enterprises]. *Gornaia promyshlennost*, 2008, no.1, pp.54-62.
33. 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 on*, 2016, pp.1-6. DOI: 10.1109/MESA.2016.7587102
34. Lajunen A. Energy efficiency of conventional, hybrid electric, and fuel cell hybrid powertrains in heavy machinery. *SAE Technical Paper*, 2015. DOI: 10.4271/2015-01-2829.
35. Esfahanian E., Meech J. A. Hybrid electric haulage trucks for open pit mining. *IFAC Proceedings Volumes*, 2013, vol.46, no.16, pp.104-109. DOI: 10.3182/20130825-4-US-2038.00042
36. Mazumdar J. All electric operation of ultraclass mining haul trucks. *Industry Applications Society Annual Meeting, IEEE*, 2013, pp.1-5. DOI: 10.1109/IAS.2013.6682568
37. 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, no.1, pp.78-87.
38. Varaschin J., De Souza E. Economics of diesel fleet replacement by electric mining equipment. *15th North American Mine Ventilation Symposium*, 2015, 8 p.
39. Uno K., Imaie K., Maekawa K., Smith G., Suyama A., Hatori J. Development of mining machinery and future outlook for electrification. *Hitachi Review*, 2013, vol.62, no.2, pp.100-112.
40. Stepuk O.G., Zuenok A.S. Dizel-trolleivoznyi transport BelAZ: perspektivy ispolzovaniia v gornom proizvodstve [Diesel-trolleybus transport BelAZ: prospects of use in mining]. *Gornyi zhurnal*, 2013, no.1, pp.52-55.
41. Khazin M.L., Shtykov S.O. Prichiny zatrudniaiushchie primenenie trolleivozov v gornoi promyshlennosti [Reasons for the use of trolleys in the mining industry]. *Tekhnologicheskoe oborudovanie dlia gornoi i neftegazovoi promyshlennosti*, 2017, pp.380-382.
42. Cruzat J.V., Valenzuela M.A. Modeling and evaluation of benefits of trolley assist system for mining trucks. *Industry Applications Society Annual Meeting, IEEE*, 2017, pp.1-10. DOI: 10.1109/IAS.2017.8101840

Просьба ссылаться на эту статью в русскоязычных источниках следующим образом:

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.166–180. DOI: 10.15593/2224-9923/2018.2.6

Please cite this article in English as:

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.166-180. DOI: 10.15593/2224-9923/2018.2.6