

УДК 622.68

Черепанов Владимир Александрович
научный сотрудник,
лаборатория транспортных систем карьеров
и геотехники,
Институт горного дела УрО РАН,
620075, г. Екатеринбург,
ул. Мамина-Сибиряка, 58
e-mail: transport@igduran.ru

Журавлев Артем Геннадиевич
кандидат технических наук,
заведующий лабораторией транспортных
систем карьеров и геотехники,
Институт горного дела УрО РАН
e-mail: juravlev@igduran.ru

СОВРЕМЕННЫЕ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ И КОНСТРУКТИВНЫЕ РЕШЕНИЯ В КАРЬЕРНОМ ТРАНСПОРТЕ*

Аннотация:

Развитие карьеров как по интенсивности их разработки, так и по существенному росту текущей и проектной глубины требует модернизации транспортных систем, формирующих основную часть себестоимости добычи. Выполнен обзор современных направлений совершенствования технологических и технических решений в области карьерного транспорта с учетом актуального состояния и развития горных работ в условиях глубоких карьеров. Основное внимание уделено автомобильному транспорту, как получившему наибольшее распространение в настоящее время. В статье отражено современное состояние горнотехнических условий карьеров во взаимосвязи с развитием транспорта, обозначены основные виды карьерного транспорта и направления их совершенствования и приведены тенденции развития горнотранспортных машин с накопителями энергии, а также с дистанционным и роботизированным управлением.

Ключевые слова: глубокий карьер, карьерный транспорт, транспортная система карьера, карьерный автосамосвал, роботизированный самосвал.

DOI: 10.25635/2313-1586.2022.04.075

Cherepanov Vladimir A.
Researcher,
Laboratory of transport systems
of open-pit mines and geotechnics,
Institute of Mining, Ural branch of RAS,
620075 Ekaterinburg,
58 Mamina-Sibiryaka Str.,
e-mail: transport@igduran.ru

Zhuravlev Artem G.
Candidate of Technical Sciences,
Head of the Laboratory of transport systems
of open-pit mines and geotechnics
Institute of Mining, Ural Branch of RAS
e-mail: juravlev@igduran.ru

MODERN TECHNOLOGICAL AND DESIGN SOLUTIONS IN MINING TRANSPORT

Abstract:

The development of quarries, in terms of both the mining intensity and a significant increase in the current and projected depth, requires the modernization of transport systems, which form the main part of the production cost. We made a review of modern directions for improving technological and technical solutions in the field of quarry transport, taking into account the current state and development trends of mining operations in deep quarries. We made the focus on quarry motor vehicles, which have become the most widespread at the present time. The article reflects the current state of mining and technical quarry conditions in conjunction with the development of transport; it identifies the main types of quarry vehicles and directions for their improvement and shows the development trends of mining vehicles with energy storage, as well as with remote and robotic control.

Key words: deep quarry, quarry transport, quarry transport system, dump truck, robotic dump truck.

Введение

Транспортирование горной массы представляет один из основных и наиболее трудоемких процессов открытых горных работ. По мере роста глубины карьеров доля затрат на карьерный транспорт доходит до 60 % в общих затратах на добычу полезного ископаемого. Транспортная составляющая оказывает значительное влияние на решение основных научных и проектных задач, а процесс транспортирования горной массы – основа открытой геотехнологии.

* Исследования выполнены в рамках Госзадания №075-00412-22ПР, тема 1 (2022-2024), (FUWE-2022-0005), рег. №1021062010531-8-1.5.1

Развитие технологий добычи полезных ископаемых и соответствующее формирование транспортных систем карьеров должно базироваться на методах учета переходных процессов при разработке инновационных решений в развитии транспортных систем карьеров, обеспечивающих устойчивое функционирование и развитие горнотехнических систем добычи полезных ископаемых при усложнении горнотехнических условий с сохранением и наращиванием производительности, а также с развитием комплексности и полноты освоения месторождений.

Для успешной разработки месторождений полезных ископаемых постоянно развивается карьерный транспорт, позволяющий эффективно применять существующие технологические решения, а также развивать новые или специальные технологии ведения горных работ [1 – 3].

Изложение рассматриваемых вопросов

Состояние горнотехнических условий карьеров во взаимосвязи с развитием карьерного транспорта

С учетом достаточно длительной истории развития современного мощного карьерного транспорта конструктивные характеристики транспортных машин достигли высокого уровня и продолжают совершенствоваться. Конструкция современных мощных карьерных транспортных машин постоянно совершенствуется, однако, если раньше комплекс конструктивных решений мог увеличить эффективность работы машины на 20 – 50 %, то сегодня шаг совершенствования эксплуатационных показателей лежит в пределах 1 – 5 % или в отдельных случаях до 10 %, а работа по усовершенствованию становится все более наукоемкой и трудоемкой. Сохранение темпов развития горнодобывающей промышленности на среднесрочную перспективу связано не только с усовершенствованием конструкций горнотранспортного оборудования, но и с освоением эффективных инновационных технологий добычи полезных ископаемых при одновременном более точном учете влияющих на эти технологии факторов.

Методологический подход по учету переходных процессов при выборе стратегии освоения месторождений [4] является актуальной теоретической базой при формировании транспортных систем глубоких карьеров в свете необходимости достижения больших глубин. В настоящее время глубина разведанных запасов алмазородных месторождений достигает 750 – 1650 м, в то время как заложенная в проектах конечная глубина разработки открытым способом достигает 750 – 820 м. В обозримой перспективе эксплуатационная глубина других наиболее крупных карьеров России, особенно с высокоценными полезными ископаемыми, также будет приближаться к 700 – 800 м. Основные факторы в части карьерного транспорта, влияющие на ведение работ при интенсивной углубке карьеров на таких глубинах: транспортные бермы ограниченной ширины при максимально возможных уклонах (от 10 до 25% и более при создании необходимой техники и обосновании безопасной технологии ведения горных работ); отсутствие возможности подготовки дорожного покрытия высокого качества в нижней зоне карьера без существенного снижения производительности карьера на время строительных работ; стесненность рабочей зоны; большая интенсивность движения при заданных показателях высокой производительности карьера; высокая загазованность.

Для достижения указанных глубин разработки открытым способом применяются новые технологические решения и горнотранспортное оборудование, позволяющее оптимизировать горные выработки. Например, применение шарнирно-сочлененных или гусеничных самосвалов и крутонаклонных транспортных съездов позволяет увеличить углы откоса бортов. Крутые автоуклоны обеспечивают меньшее количество витков спиральной трассы, размещаемой на бортах карьера, а самосвалы меньшей ширины позволяют сократить ширину транспортной бермы в глубинной зоне карьера. Вследствие этого увеличиваются углы откоса бортов и сокращаются вскрышные работы. Также для

увеличения глубины разработки открытым способом возможен вариант размещения автосъездов в подземных выработках за контурами карьера (тоннельное вскрытие). Данная технология позволяет минимизировать влияние транспортных коммуникаций на разнос бортов карьера и сократить дополнительный объем вскрыши [5].

Таким образом, в настоящее время и на ближайшую перспективу выделяются следующие отличительные особенности сложившихся экономических и горнотехнических условий для разработки инновационных решений в области транспортных систем глубоких карьеров:

- высокие темпы понижения горных работ;
- этапность разработки с неоднократным разносом бортов;
- значительная глубина отработки, стесненные условия ведения горных работ в глубинной зоне карьеров;
- необходимость минимизации продолжительности переходных процессов (реконструкция транспортной системы, своевременное обоснование, выбор и оптимизация видов и комбинаций современного карьерного транспорта);
- ресурсо- и энергосбережение (на всех процессах горных работ);
- снижение себестоимости перевозок;
- снижение негативного воздействия на атмосферу рабочей зоны и окружающую среду.

Учитывая отличительные особенности разработки месторождений, приведенные выше, выделим следующие направления развития транспортных систем карьеров:

- применение стационарных видов транспорта с низкими эксплуатационными затратами, (в т.ч. использующими в качестве энергоресурса электроэнергию);
- совершенствование автомобильного транспорта;
- внедрение электрифицированных видов транспорта;
- переход на использование местных и возобновляемых источников энергии (в т.ч. миниэлектростанций и перевода оборудования на электропривод);
- повышение коэффициента использования оборудования за счет конструктивных, технологических и организационных решений (проблема особенно актуальная для стационарных видов транспорта – конвейерных и иных видов подъемников);
- развитие технологий, обеспечивающих разработку месторождений открытым способом на большую глубину (в т.ч. развитие технологий с самоходным транспортом при вскрытии крутонаклонными съездами открытого заложения, крутонаклонными подземными тоннелями и др.);
- развитие поточных или специальных видов транспорта с малыми эксплуатационными затратами, использующими в качестве энергоисточника электрическую энергию, способными оперативно подвигаться вслед за развитием горных работ, в комплексе с погрузо-доставочным оборудованием, заменяющим экскаваторно-автомобильные комплексы для глубоких, относительно небольших карьеров, с производственной мощностью по горной массе до 20 млн т/год. Таким оборудованием могут быть погрузчики [6] либо специально разработанные самозагружаемые транспортные машины для условий добычи полезных ископаемых, имеющие грузоподъемность 40 – 120 т, работающие на низкоэмиссионных энергосиловых установках (газомоторные двигатели, комбинированные энергосиловые установки, аккумуляторные машины и др.);
- необходимость развития циклично-поточной и поточной технологий транспортирования горной массы из глубоких карьеров на базе крутонаклонных конвейеров с высокой технологической гибкостью, возможностью наращивания конвейерных подъемников без остановки их работы на длительный период и оперативным переносом дробильно-перегрузочных установок с частотой передвигки 1 – 2 года; дробильно-перегрузочные установки должны отличаться максимальной компактностью, минимально возможной высотой встраивания в уступ перегрузочного пункта для сокращения размеров площадок перегрузочных пунктов в карьере;

- применение роботизированных комплексов выемочно-погрузочного и транспортно-оборудования, обеспечивающих снижение эксплуатационных затрат, повышение производительности оборудования и в конечном счете фондоотдачу, безопасность персонала при обработке участков в опасных горнотехнических условиях.

Основные виды карьерного транспорта и направления их совершенствования

Область применения разных видов транспорта не является статичной и изменяется вслед за техническим развитием средств транспорта, выводом их в серийное производство, изменением целевой группы горнотехнических условий эксплуатации.

Железнодорожный транспорт

Железнодорожный транспорт в настоящее время и в среднесрочной перспективе сохранит свою область применения на перевозках в качестве магистрального звена карьерного и поверхностного транспорта на тех предприятиях, где он уже эксплуатируется достаточно длительное время. Планово обновляется парк тяговых агрегатов и вагонов, ведется постепенная модернизация существующих моделей подвижного состава, направленная на повышение весовой нормы поездов для увеличения производительности.

Автомобильно-конвейерный транспорт

Одним из наиболее апробированных видов комбинированного транспорта, обеспечивающего высокую производительность, является автомобильно-конвейерный транспорт. Поэтому в современных исследованиях уделяется внимание его адаптации [7] к перспективным горнотехническим условиям: высокая динамика развития открытых горных работ с формированием глубоких карьеров, необходимость достижения глубин открытой разработки в предварительных проработках до 800 – 1200 м. Актуальной научно-технической проблемой является разработка технологий поэтапного ввода высокопроизводительного эффективного оборудования циклично-поточного транспорта на большую глубину при минимальном дополнительном разnose бортов. При этом возможно использование как крутонаклонных, так и традиционных ленточных конвейеров в зависимости от конкретных условий эксплуатации. Конвейерный транспорт по экономичности и производительности предпочтителен для эксплуатации на основной стадии жизненного цикла глубоких карьеров, но его применение сдерживается рядом факторов [8]. Тем не менее циклично-поточная технология (ЦПТ) начинает все более активно применяться в последнее время, причем как для доставки полезного ископаемого, так и для доставки вскрышных пород, а применение крутонаклонных конвейеров может решить вопросы вскрытия карьеров на глубину до 1000 м [9]. В России реализуются проекты по внедрению ЦПТ на крупнейших ГОКах. На Лебединском ГОКе построен мощный комплекс ЦПТ с двумя нитками конвейеров. На Михайловском ГОКе построен дробильно-конвейерный комплекс с двухстадийным дроблением и крутонаклонным конвейером с прижимной лентой и начато строительство второго комплекса с традиционным ленточным конвейером и полустационарной одностадийной дробильно-перегрузочной установкой. В Костомукшском карьере ведется строительство объектов комплекса ЦПТ. Планируется внедрение рудного комплекса ЦПТ на Стойленском ГОКе.

Карьерный автомобильный транспорт

Наиболее широко в настоящее время (при любой производительности карьеров) применяется автомобильный транспорт, который на ближайшие 20 – 30 лет останется основным сборочным и сборочно-магистральным видом транспорта. Развитие объемов добычи связано с его более широким внедрением. В связи с этим наиболее востребован прогресс именно в развитии автомобильного транспорта. Основное направление в развитии карьерного автомобильного транспорта – дальнейшее улучшение его эксплуатационных показателей и повышение экономичности:

- повышение удельной мощности;

- повышение топливной экономичности;
- модернизация отдельных узлов и элементов карьерных автосамосвалов: усовершенствование трансмиссии, внедрение систем автоматического управления различными параметрами (в т.ч. высокоинтеллектуальных систем управления, контроля и диагностики), изменения в конструкции кузова и т.д.
- повышение ресурса шин;
- повышение скорости движения, в т.ч. по автодорогам с низким качеством и/или состоянием покрытия;
- снижение выбросов вредных веществ;
- повышение грузоподъемности при сохранении габаритной ширины и маневренности;
- увеличение ресурса, переход на использование электрической энергии (троллейно-аккумуляторные, аккумуляторные модификации).
- совершенствование роботизированных самосвалов (в т.ч. бескабинных вариантов исполнения) и погрузочных машин (экскаваторы, погрузчики); развитие систем типа «интеллектуальный карьер» [10] (полностью автоматизированные карьеры и шахты).
- самосвалы на газомоторном топливе;
- дизель-троллейвозы, троллейно-аккумуляторные самосвалы, а также электромобили (карьерные автосамосвалы);
- развитие отдельных узлов и конструктивных элементов карьерных автосамосвалов для увеличения их удельной мощности, повышения уровня максимального преодолеваемого уклона, снижения ширины карьерных автосамосвалов (бескабинный вариант, автопоезд [11]), усовершенствования трансмиссии, изменения в конструкции кузова, модернизации двигателей и энергосиловых установок (в т.ч. применение различных комбинированных энергосиловых установок и накопителей энергии), оптимизации конструкции шин (одно из направлений – безвоздушные шины) и др.

Роботизированные автосамосвалы

Основные преимущества при эксплуатации роботизированных горных машин:

- повышение безопасности при разработке месторождений полезных ископаемых, особенно в экстремальных горнотехнических и/или климатических условиях;
- возможность работы в удаленных от развитой инфраструктуры районах либо в труднодоступных местах;
- увеличение производительности;
- увеличение времени эксплуатации техники за счет использования оптимальных режимов работы и минимизации перегрузочных режимов;
- снижение времени обслуживания и минимизация нетехнологических простоев, а также простоев, связанных с климатическими условиями;
- снижение эксплуатационных затрат на топливо, шины.

Практически все крупные мировые производители шахтной и карьерной техники (БелАЗ, Sandvik, AtlasCopco, Komatsu, Caterpillar, Hitachi, КАМАЗ, Volvo, Scania) предлагают готовое или анонсируют разрабатываемое горное оборудование с роботизированным управлением. За рубежом накоплен значительный опыт реализации проектов автоматизации машин на горных предприятиях с открытым (Чили, Мексика, США, Канада, Австралия [12] и др.) и подземным способами (ЮАР, Швеция, Финляндия, Канада, Чили, Австралия [13] и др.) добычи. Причем это может быть как автоматизация локальной зоны, и оператор остается в пределах горной выработки (карьера или шахты), так и в целом роботизация всего горнодобывающего комплекса – тогда операторы могут быть выведены из карьера либо в удаленный центр управления для осуществления контроля и вмешательства только в случаях нештатных ситуаций.

В России реализован проект доработки карьера «Удачный» с применением дистанционного управления горнотранспортным комплексом машин в условиях доработки нижней зоны с крутонаклонным вскрытием [14]. Кроме того, «ВИСТ Групп» испытал

свою систему роботизированного управления на самосвале UNIT RIG MT3300 в Марокко.

В 2010 г. Белорусским автозаводом совместно с компанией «ВИСТ Групп» представлен дистанционно-управляемый карьерный самосвал БелАЗ-75131 грузоподъемностью 130 т [16]. К настоящему времени роботизированный БелАЗ-7513R грузоподъемностью 130 т с интеллектуальной системой управления зарекомендовал себя как высокопроизводительная техника в условиях разреза «Черниговский» в Хакасии при эксплуатации для перевозки вскрыши по выделенному участку протяженностью 1350 м [15]. В 2021 г. на РУПП «Гранит» на месторождении «Ситницкое» (Республика Беларусь) проходили испытания роботизированного промышленного комплекса из карьерных роботизированных автосамосвалов БелАЗ-7558R грузоподъемностью 90 т и фронтального погрузчика с системой дистанционного управления БелАЗ-7825D с вместимостью ковша 12 м³. На территории развернута система видеонаблюдения и контроля доступа, организован диспетчерский пункт, сетевая и электрическая инфраструктура [15].

Завод БелАЗ готов устанавливать оборудование для роботизированного управления на любую модель карьерного самосвала БелАЗ с электромеханической трансмиссией грузоподъемностью от 90 до 450 т [16].

Основными тенденциями развития транспортных систем карьеров с использованием роботизированных машин являются следующие:

1. Большинство крупнейших производителей горных машин для открытой и подземной добычи полезных ископаемых разработали или разрабатывают свое оборудование с возможностью использования в роботизированном и ручном режиме управления.

2. В перспективе будет нарастать потребность в роботизированных системах управления горнодобывающими комплексами с целью снижения затрат на оплату труда и эксплуатацию оборудования (в том числе в условиях нехватки рабочей силы в отдаленных районах) или для доработки разведанных запасов в тяжелых условиях.

3. В связи с тем что роботизированное управление находится на стадии развития, в настоящее время внедрение систем удаленного управления идет поэтапно от полуавтоматических систем к постепенной автоматизации всех процессов. Имеются отдельные проекты, которые изначально рассчитаны на создание полностью роботизированных карьеров и участков шахт.

4. В случае внедрения полностью роботизированных машин появляется возможность изменения и оптимизации конструкции выемочно-погрузочных и транспортных машин в связи с

- отсутствием потребности в кабине;
- отсутствием негативного влияния факторов на оператора.

Благодаря этому можно добиться повышения грузоподъемности, объема грузовой платформы, мощности силовой установки, оптимизировать нагрузку на шины, обеспечить безразворотное движение.

5. Накопление опыта применения безлюдных технологий приведет к оптимизации параметров горных выработок и разработке новых технологий добычи полезных ископаемых (потребует адаптации нормативно-технической базы), которые могут существенно отличаться от имеющихся по параметрам и способам ведения горных работ (реконструкция нижней зоны с увеличением уклонов съездов и рабочих площадок, изменение высоты уступов, изменение углов бортов карьера, сужение ширины дорог и др.), что обусловлено отсутствием опасного влияния на рабочих, а также конструктивными особенностями и технологическими возможностями применения роботизированных горных машин и комплексов.

Самосвалы на газомоторном топливе

Применение газомоторного топлива обусловлено следующими основными факторами:

- меньшей стоимостью газа по сравнению с дизельным топливом (до 50 %);

- решением вопроса снижения количества вредных выбросов и загазованности карьерного пространства.

На заводе «БелАЗ» реализуется несколько проектов по созданию карьерных самосвалов на газомоторном топливе [17] в двух направлениях: газодизель и чистый газ. Выпущены модели карьерных самосвалов БелАЗ в газодизельном исполнении грузоподъемностью 45 и 130 т, а также БелАЗ-75476 грузоподъемностью 45 т (представлен в 2017 г.), полностью работающий на метане [18]. Ведутся работы над БелАЗ-7558 грузоподъемностью 90 т с двигателем на газовом топливе [15].

На сегодняшний день изготовлен карьерный самосвал грузоподъемностью 136 т с газодизельным двигателем на базе дизеля Cummins KTA 50-C [17]. С июня 2017 г. компанией ООО «ТехноЭко» (Сибирь-Энерго, г. Новокузнецк) и др. было переоборудовано 68 карьерных самосвалов БелАЗ-75131 для применения сжиженного природного газа (СПГ) и эксплуатации в газодизельном режиме. На начальном этапе применялась система дозирования и подачи газа в двигатель собственной разработки, позже стали применять систему подачи газа производства ComAp. Средний коэффициент замещения по всему автопарку составляет 30 – 35 % [15, 16]. В ходе реализации проекта в 2017 г. введена в эксплуатацию первая очередь завода по сжижению природного газа производственной мощностью 1,5 т в час, а также создана заправочная инфраструктура, включающая современные криогенные передвижные автозаправщики и заправочные площадки на участках горных выработок [16, 19].

С апреля 2018 г. карьерный самосвал БелАЗ-75746 успешно работает в АО «Невьянский цементник» (Свердловская область). По результатам испытаний БелАЗ на СПГ выявлены следующие преимущества: снижение затрат на топливо в стоимостном выражении в два раза по сравнению с новым аналогичным карьерным самосвалом на дизельном топливе; увеличенный межсервисный интервал до 500 мч против 250 мч у БелАЗ-7547 [17]. Другой карьерный самосвал БелАЗ-75476, переоборудованный для применения компримированного природного газа после испытаний в карьере Ломоносовского ГОКа, продолжит работу в компании «АЛРОСА» [15]. Топливная экономичность по показателю в граммах на кВт/ч практически равна топливной экономичности двигателя ЯМЗ-240НМ2. Однако при относительно невысокой стоимости газового топлива экономические преимущества от использования очевидны [17].

Дизель-троллейбусы и электромобили

За последние десятилетия реализовано немало проектов применения мощного дизель-троллейбусного транспорта в условиях действующих карьеров и шахт, а также опытно-промышленные образцы карьерных самосвалов с комбинированными (гибридными) энергосиловыми установками, карьерных автосамосвалов и шахтных электромобилей (самоходных машин с питанием от аккумуляторов) не только за рубежом, но и в России [20, 21].

Как показали недавние исследования ИГД УрО РАН, параметры тяговых электрохимических аккумуляторов, прежде всего Li-Ion, в настоящее время подошли к такому уровню удельной энергоемкости и стоимости, который обеспечивает их эффективное освоение в сфере карьерного технологического транспорта. А с учетом среднего темпа совершенствования Li аккумуляторов с 5 – 10-процентным увеличением энергоемкости ежегодно видна конкретная перспектива внедрения карьерного автотранспорта с электропитанием: аккумуляторных и троллейно-аккумуляторных самосвалов.

В этом направлении БелАЗом ведутся работы по трем сегментам в области транспорта с электропитанием [15]:

1) дизель-троллейбус – самосвал с дизельным двигателем и троллейной системой для работы как на участках с установленной контактной сетью, так и в режиме обычного карьерного самосвала;

2) троллейно-аккумуляторный самосвал – самосвал, движущийся на постоянных автодорогах в режиме троллейвоза, а на временных переходящий на питание от аккумуляторов энергии;

3) электросамосвал – использующий в качестве силовой установки блоки тяговых аккумуляторов.

На заводском полигоне БелАЗ смонтирован опытный участок с тяговой подстанцией и контактной троллейной сетью протяженностью более 500 м и прошли испытания современного дизель-троллейвоза БелАЗ-7530Е грузоподъемностью 220 т [15].

Основные преимущества при эксплуатации дизель-троллейвозов:

- снижение расхода топлива (до 80 % в зависимости от участков троллейной сети);
- применение дизельного двигателя меньшей мощности;
- снижение загазованности (сокращение выбросов вредных веществ);
- экономия затрат на сервисное обслуживание и горюче-смазочные материалы;
- увеличение скорости движения на подъем (до 2 раз по сравнению с аналогичным карьерным автосамосвалом).

Накопители энергии возможно рассматривать для применения как на карьерном автотранспорте в чисто электрических самосвалах (только с аккумуляторами энергии), так и в дизель-электрических самосвалах либо в дизель-троллейвозом исполнении. Кроме транспорта, применение накопителей востребовано на всей горной технике: погрузчиках, экскаваторах, буровых станках и т.д. как на открытых горных работах, так и для подземной разработки. В результате анализа развития накопителей энергии, которые могут подходить для карьерного транспорта (емкости, скорости заряда, веса, объема, стоимости, срока эксплуатации), наблюдается увеличение емкости и скорости заряда накопителей, а также постепенное уменьшение их удельной стоимости с годами. В настоящее время уровень развития технологий позволяет внедрять различные энергосиловые установки и оборудование с электропитанием на мощной транспортной технике горнодобывающих предприятий, в том числе на карьерных автосамосвалах, даже без использования дополнительных источников энергии для работы (табл. 1). При этом для оптимальной эксплуатации таких машин необходимо учитывать особенности конкретных горно-геологических условий эксплуатации, а также ряд факторов, ограничивающих эффективную область применения аккумуляторных самосвалов. При увеличении затрат на дизельное топливо по сравнению с затратами на электроэнергию актуальность от применения техники с накопителями энергии будет возрастать. Кроме этого, транспорт на электротяге позволит нейтрализовать негативный эффект от скопления выхлопных газов и снизить затраты на проветривание (как при подземной разработке месторождений, так и в стесненных условиях карьеров).

Несмотря на значительные капитальные затраты на аккумуляторы и зарядные станции либо троллейные системы, внедрение электрифицированного транспорта позволит снизить затраты на энергоресурсы (дизельное топливо); снизить выбросы вредных веществ с отработавшими газами; повысить надежность, коэффициент технической готовности транспортных средств, а следовательно, и затраты на обслуживание и ремонт; увеличить производительность при питании от мощной электроконтактной сети; развивать мощности резервных аккумуляторных источников питания для энергетики за счет использования дешевых отработавших на транспорте накопителей.

Опыт применения горнотранспортных машин с накопителями энергии приведен в табл. 1. В 2021 г. выпущен карьерный автосамосвал БелАЗ-7558Е грузоподъемностью 90 т полностью на аккумуляторных батареях мощностью 675 кВтч [15], заряжаемых от станции и рекуперированной при торможении энергией. Программа испытаний БелАЗ-7558Е включает как этап заводских испытаний (они уже завершены), так и промышленно-эксплуатационные в условиях карьера РУПП «Гранит» (г. Микашевичи, Республика Беларусь). Аккумуляторный самосвал рассчитан на максимальную скорость до 64 км/ч, способен заряжаться в течение 20 мин, при этом время работы на одной зарядке – от 2 до 8 часов [24].

Таблица 1

Аккумуляторы на основе Li, установленные на горной самоходной технике [20 – 23]

Показатели	Литий-ионные (Li-Ion) без конкретизации типа		Литий-ферро-фосфатные (LiFePO ₄ , LFP)				Литий-никель-марганец-кобальт-оксидные (Li-NMC, NMC)		
	Основные достоинства	Основные недостатки							
Основные достоинства	<ul style="list-style-type: none"> - Высокая энергетическая плотность. - Большое число циклов заряд-разряд. - Не требуют обслуживания. - Низкая цена (на аккумуляторы с Li). 		<ul style="list-style-type: none"> - Большой диапазон рабочих температур (морозоустойчивы). - Большая объемная емкость. - Подходят для использования в оборудовании с высокими токовыми нагрузками. - Допускается быстрая зарядка высокими токами. - Высокая долговечность. - Низкое выделение тепла (заряд/разряд). 				<ul style="list-style-type: none"> - Большой диапазон рабочих температур (морозоустойчивы). - Большая удельная энергоемкость. - Относительно небольшая масса и габаритные размеры. - Допускается быстрая зарядка высокими токами. 		
Основные недостатки	<ul style="list-style-type: none"> - Малый типоразмер. - Относительно малая удельная энергоемкость. - Необходимость охлаждения при зарядке. - Теряют емкость на холоде. - При «быстрой» зарядке теряют число циклов и емкость. 		<ul style="list-style-type: none"> - Большая масса и габариты. - Балансировка при использовании сборными модулями. 				<ul style="list-style-type: none"> - Относительно новая технология (малое количество циклов). - Балансировка при использовании сборными модулями. 		
Тип машины, на которой установлен аккумулятор	MT42 Battery (ПАС)	Cat R1700 XE (ПДМ)	Toro LH514BE (ПДМ)	Z 40 / Z50 (ПАС)	Xiangtan Electric Manufacturing (КАС)	BYD V60 (КАС)	БелАЗ- 7558E (КАС)	VOLVO HX-02 (бескабинный самосвал)	eDumper (КАС на базе Komatsu 605-7)
Грузоподъемность, т	42	15	14	40 / 50	120	30	90	15	65
Способ зарядки	CCS 2.0 от трехфаз. сети	Сверхбыстрая зарядка на борту	От трехфаз. сети	Сменные АБ для быстрой замены	От трехфазной сети	От трехфазной сети (быстрая зарядка)	От зарядной станции и за счет рекуперации	Токоведущая штанга с подключением под самосвалом	От зарядной станции и за счет рекуперации
Номинальная мощность электродвигателя, кВт	200	226	320	440 / 980	–	–	640	200	590
Энергоемкость АКБ, кВт·ч	425	213	–	310 / 354	1575	394	–	–	700
Масса АКБ, т.	5,1	–	0,91	– / 8,255	–	10	–	–	4,5
Время полной зарядки, мин	120	30	–	10 сек на смену АБ	60	–	25	1	–

ПДМ – подземная погрузо-доставочная машина; КАС – карьерный автосамосвал; ПАС – подземный автосамосвал; АБ – блоки аккумуляторных батарей

Обзор безвоздушных шин¹

Разработчик	Конструкция	Условия применения
1	2	3
MICHELIN® X® TWEEL [25, 26, 27]	Амортизационные спицы, внешний обод. Безвоздушное колесо радиальной конструкции (обод, спицы, протектор заменяют собой целое колесо). <i>Преимущества:</i> отсутствие необходимости в техническом обслуживании; высокая износостойкость (в 2 – 3 раза выше, чем у пневматической шины); нет простоев по причине спуска шин; простота эксплуатации; комфорт оператора. <i>Недостатки:</i> Сложность в производстве; шум и нагрев при больших скоростях; отсутствие производственных мощностей для массового выпуска.	Изначально произведена для мини-погрузчика (максимальная скорость 15 – 17 км/ч). Максимальная скорость для легковых авто до 80 км/ч (плохая балансировка и вибрации). К 2024 г. планируется выпуск для легковых автомобилей. Изготовлены в типоразмерах 12N16.5, 10N16.5, 12N16.5. В продаже для коммерческой техники.
Hankook IFlex [25, 27, 28]	Устанавливается на обычный диск. Вместо спиц специальные микросетчатые прослойки по всему периметру для равномерного распределения нагрузки. <i>Недостатки:</i> Сложность в производстве; шум и нагрев при больших скоростях; отсутствие производственных мощностей для массового выпуска.	Предельная скорость для легковых авто 130 км/ч. В стадии разработки.
Bridgestone AirFree [25, 27, 29]	Цельная конструкция. В качестве амортизирующей прослойки используются специальные резиновые полосы особой формы. Поверхность, контактирующая с дорогой, покрывается сменным протектором из тонкой полосы более твердой резины. <i>Преимущества:</i> снижение отходов и улучшение возможности переработки.	Грузоподъемность 150 кг. Скорость не более 64 км/ч. Первый прототип создан в 2011 г.
Toyo noair [30]	Распорки созданы из специального эластичного материала, переплетенной буквой «X», и обеспечивают постоянный контакт покрышки с поверхностью. <i>Преимущества:</i> более низкий коэффициент сопротивления качению (по сравнению со стандартными шинами).	Первый прототип создан в 2012 г.
Суперэластик [31]	Цельнолитая шина. <i>Преимущества:</i> высокая производительность – способность выдержать большое количество повреждений (механических и химических); дополнительная устойчивость техники. <i>Недостатки:</i> возрастающая нагрузка на ходовую часть техники, что приводит к ее быстрому износу; высокая стоимость.	Работа на складах и стройках. Производят компании из Азии, Европы, России (ВКТ, Solideal, Camso, Deestone, Kenda).

¹ В обзоре принимали участие н.с. Глебов И.А., н.с. Чендырев М.А.

1	2	3
Патент [32]: автомобильная шина с упругими деформируемыми спицами.	Безвоздушная шина со спицами из электроактивных полимеров.	Улучшение опорной проходимости по слабонесущим поверхностям движения, снижение расхода топлива при движении по твердым поверхностям, значительное улучшение плавности хода и устойчивости транспортно-технологических машин при различных режимах движения.
Патент [33]: колесо с пневматиком в сборе.	Жесткое колесо включает в себя центральный участок и множество расположенных с интервалами по окружности крепежных элементов, съемным образом прикрепленных к радиально внешней кромке центрального участка. Шина установлена на колесе и зацепляет крепежные элементы так, что участки шины, не зацепляющие крепежные элементы, отделены радиально от колеса пространством.	Шина может включать в себя один или более элементов, работающих на растяжение, вмонтированных в шину для увеличения конструкционной прочности и упругости шины. Минимизация разрушения структуры почвы.
Патент [34]: способ армирования автомобильных безвоздушных шин	Армирование предназначено для автомобильных безвоздушных шин с упругими спицами, соединяющими между собой наружное кольцо с протектором и внутреннее кольцо, закрепленное на металлическом ободе колеса тонкими армированными трубками.	Уменьшение нагрева наружного кольца шины, снижение массы, трудоемкости процесса армирования.
Патент [35]: автомобильное колесо с безвоздушной шиной	Автомобильное колесо с безвоздушной шиной представляет собой неразборную конструкцию и состоит из металлического колеса 1 и шины с упругими деформируемыми спицами, изготовленной из полимерного эластичного материала.	Обеспечение неизменности характеристики радиальной жесткости безвоздушной шины по периметру беговой дорожки, уменьшение вибрации и шума при качении колеса, повышение прочности и надежности колесного движителя.
Resilient Technologies [25]	Шина NTP. Упругие элементы шины выполнены в форме сот для обеспечения хорошей несущей способности шин.	Для военных автомобилей. Способна выдерживать статическую нагрузку до 1746 кг и дает возможность передвижения при разрушении до 30 %.

Применение безвоздушных шин

Существенной проблемой пневмоколесного транспорта является несовершенство шин. Они имеют сопротивление качению порядка в 5 – 8 раз выше, чем у железнодорожного транспорта, что определяет соответствующую кратность энергозатрат на перемещение и себестоимость транспортирования. С другой стороны, в условиях распутицы и гололеда резиновые шины не обеспечивают достаточного сцепления с опорной поверхностью. Также при движении по неровной автодороге часть колебаний на неподдрессоренные массы гасится за счет деформации, однако целесообразно повысить способность шин гасить неровности автодороги, поскольку поддержание технологических карьерных автодорог в хорошем состоянии осложнено в условиях значительного грузопотока или специальных зауженных автодорог глубоких карьеров.

Способом реализации указанных усовершенствований колес карьерных автосамосвалов могут быть специальные безвоздушные шины (табл. 2). Изначально шины подобных конструкций применялись в военной промышленности. Суть их конструкции в формировании системы тяг, работающих на растяжение и обеспечивающих подвешивание оси. Таким образом, сжатый воздух для поддержания формы колеса не требуется.

Помимо очевидных преимуществ, связанных, например, с невосприимчивостью к повреждениям протектора, имеется теоретическая возможность направленного формирования свойств колеса [25], в том числе огибание неровностей. Освоение возможности управлять свойствами элементов шины позволит также изменять упругость шины, влияя на свойства поддрессоривания масс автомобиля, а также увеличивая или уменьшая площадь контакта с автодорогой, и таким образом управлять давлением в пятне контакта, а следовательно, коэффициентами сопротивления качению и сцеплению колес с дорогой.

Серийное производство безвоздушных шин требует дальнейших исследований и испытаний в различных режимах и условиях эксплуатации (особенно для карьерных автосамосвалов из-за их большой массы и значительных размеров колес), а также совершенствования физико-механических свойств применяющихся эластичных полимерных материалов [36].

Выводы

Основные тенденции развития технологических и конструктивных решений в карьерном транспорте, сложившиеся на сегодняшний день и обозримую перспективу:

1. Глубина наиболее крупных карьеров России достигает 650 – 700 м и в обозримой перспективе будет приближаться к 700 – 800 м, а по некоторым видам ценных полезных ископаемых может быть увеличена в дальнейшем до 800 – 1200 м. При этом возрастает интенсивность ведения горных работ для поддержания высокой производительности ГОКов, что накладывает определенные требования на эксплуатацию карьерного транспорта. При обосновании транспортных систем карьеров для усложняющихся горнотехнических условий необходимо учитывать комплексность и полноту освоения месторождений (в т.ч. технологии обработки руд с низким содержанием полезных компонентов), сохранение или наращивание производительности, а также устойчивое функционирование и развитие всей горнотехнической системы добычи полезных ископаемых. Это возможно на базе методологического подхода по учету переходных процессов в стратегии формирования горнотехнических систем.

2. Основными видами карьерного транспорта по-прежнему остаются автомобильный, железнодорожный, конвейерный и их комбинации. Направления совершенствования современного карьерного транспорта:

2.1. Модернизация конструкций или отдельных узлов транспортных машин (прежде всего автотранспорта).

2.2. Развитие технологий ведения горных работ (в т.ч. с самоходным транспортом при вскрытии крутонаклонными съездами открытого заложения либо крутонаклонными подземными тоннелями; циклично-поточной и поточной технологии транспортирования горной массы из глубоких карьеров на базе крутонаклонных конвейеров с высокой технологической гибкостью, возможностью наращивания конвейерных подъемников без остановки их работы на длительный период и оперативным переносом дробильно-перегрузочных установок и др.) с учетом переходных процессов в горнотехнических системах и влияющих на них разноплановых факторов, которые складываются в современных горнотехнических и экономических условиях.

2.3. Усовершенствование организационно-технических параметров применения карьерного транспорта (повышение коэффициента использования оборудования за счет конструктивных, технологических и организационных решений).

2.4. Повышение актуальности внедрения специализированных видов транспорта.

3. Существенная доля перевозок среди всех видов карьерного транспорта приходится на автомобильный, который на ближайшие 20 – 30 лет останется основным сборочным и сборочно-магистральным видом транспорта.

Основными тенденциями в развитии карьерного автомобильного транспорта являются дальнейшее улучшение его эксплуатационных показателей и повышение экономичности, которые направлены на совершенствование следующих характеристик:

- повышение удельной мощности для увеличения производительности;
- повышение топливной экономичности;
- повышение ресурса, сцепных свойств, снижение сопротивления качению шин; перспективным направлением является внедрение безвоздушных шин, а в среднесрочной перспективе – шин с управляемыми свойствами;
- повышение скорости движения, в т.ч. по автодорогам с низким качеством и/или состоянием покрытия (одно из направлений – безвоздушные шины), улучшение коэффициента сцепления;
- снижение выбросов вредных веществ;
- снижение рисков для персонала и улучшение условия труда – за счет внедрения систем дистанционного и роботизированного управления, а также активных систем безопасности (предотвращения столкновения, «антисон» и т.п.);
- повышение производительности (грузоподъемности, скорости) при сохранении габаритной ширины, маневренности, коэффициента тары;
- увеличение ресурса узлов и агрегатов;
- совершенствование компоновки самосвалов за счет роботизации и отказа от кабины водителя, применения аккумуляторных энергосиловых установок;
- переход на использование электрической (более дешевой, «экологичной») энергии и внедрение аккумуляторных, троллейно-аккумуляторных, дизель-троллейвозных модификаций карьерных автосамосвалов; это позволяет в том числе использовать более дешевые местные и возобновляемые источники энергии;
- развитие систем типа «интеллектуальный карьер» (полностью автоматизированные карьеры и шахты).

4. В ИГД УрО РАН на протяжении последних лет ведется разработка современных инновационных решений в области транспортных систем карьеров, соответствующих большинству отмеченных в статье тенденций, в том числе для определения областей применения, обоснования конструктивных параметров, а также для разработки технологии использования следующих видов транспорта: гусеничные самосвалы; автопоезда; карьерные наклонные канатные подъемные установки [37]; вскрытие с применением крутых уклонов и тоннелей с использованием полноприводных (в т.ч. шарнирно-сочлененных) самосвалов; троллейвозы; дизель-троллейвозы; карьерные самосвалы с комбинированными энергосиловыми установками и накопителями энергии;

горнотранспортная техника с роботизированным и дистанционным управлением; крутонаклонные конвейеры и др. В лаборатории транспортных систем карьеров и геотехники ИГД УрО РАН ведутся работы по следующим актуальным направлениям:

- технико-экономические обоснования как по базовым видам транспорта (автомобильный, железнодорожный, конвейерный), так и по специальным (приведенным выше);
- обоснование стратегии развития транспортной системы на долгосрочную перспективу с учетом динамики горных работ, технологических и иных рисков;
- обоснование технологий вскрытия карьеров крутонаклонными автомобильными съездами (до 35 – 45 %);
- сквозная оптимизация транспортных систем карьеров на всем жизненном цикле;
- разработка технологических решений внедрения циклично-поточных технологий, крутонаклонного конвейерного транспорта;
- разработка технологических решений по внедрению крутонаклонных канатных карьерных подъемных установок;
- выявление резервов повышения производительности и оптимизации технологической схемы транспорта на основе компьютерного моделирования;
- специальные перегрузочные системы (авто-авто, авто-конвейер и др.) для глубоких карьеров;
- обоснование схем транспорта при комбинированной открыто-подземной разработке месторождений;
- разработка технических заданий на системы горного оборудования с дистанционным и роботизированным управлением, обоснование проектных решений, параметров рабочих площадок, транспортных коммуникаций, алгоритмов работы.

Список литературы

1. Яковлев В.Л., Яковлев В.А., 2017. Актуальные проблемы карьерного транспорта и перспективы его развития. *Проблемы недропользования*, № 4(15), С. 5 – 9. DOI: <https://doi.org/10.18454/2313-1586.2017.04.005>
2. Потапов М.Г. Белозеров В.И., 2000. Направления развития карьерного автотранспорта. *Горный информационно-аналитический бюллетень*, № 10, С. 31 – 32.
3. Кулешов А.А., 2000. Основные направления повышения эффективности карьерного автотранспорта на современном этапе развития открытых горных работ. *Горный информационно-аналитический бюллетень*, № 1, С. 197 – 200.
4. Яковлев В.Л., 2019. *Исследование переходных процессов – новое направление в развитии методологии комплексного освоения георесурсов*. Екатеринбург, УрО РАН, 284 с.
5. Акишев А.Н., Лель Ю.И., Глебов И.А., 2019. Инновационная технология вскрытия и разработки глубоких кимберлитовых карьеров. *Известия Тульского государственного университета. Науки о Земле*, № 3, С. 111 – 123. DOI 10.25635/ИМ.2019.87.37803.
6. Журавлев А.Г., Черных В.В., 2022. Граничные технико-экономические показатели применимости фронтальных погрузчиков при работе в качестве выемочно-транспортных машин. *Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов*, Т. 333, № 5, С. 186 – 195. DOI 10.18799/24131830/2022/5/3500.
7. Глебов А.В., 2022. Концепция методологии взаимной адаптации автомобильно-конвейерного транспорта и развивающейся горнотехнической системы карьера. *Горная промышленность*, № S1, С. 78 – 85. DOI 10.30686/1609-9192-2022-1S-78-85.

8. Журавлев А.Г., Семенкин А.В., Черепанов В.А. и др., 2022. Задачи развития перспективных циклично-поточных технологий для глубоких карьеров. *Горная промышленность*, № S1, С. 53 – 62. DOI 10.30686/1609-9192-2022-1S-53-62.
9. Решетняк С.П., Авраамова Н.С., 2022. Обоснование и реализация рациональных технологических схем автомобильно-конвейерного транспорта скальных горных пород для глубоких карьеров. *Рациональное освоение недр*, № 1(63), С. 32 – 39. DOI 10.26121/RON.2022.59.77.005.
10. Трубецкой К.Н., Рыльникова М.В., Клебанов Д.А., Макеев М.А., 2017. Научно-технические вопросы изменения организации управления открытыми горными работами с применением роботизированной карьерной техники. *Горная промышленность*, № 5(135), С. 27 – 30.
11. Черепанов В.А., 2020. К вопросу применения автопоездов на горных работах. *Проблемы недропользования*, № 4(27), С. 73 – 88. DOI 10.25635/2313-1586.2020.04.073.
12. Соболев А.А., 2020. Анализ опыта применения беспилотных карьерных самосвалов. *Горный журнал*, № 4, С. 51 – 55. DOI 10.17580/gzh.2020.04.10.
13. Тарасов П.И., Журавлев А.Г., Черепанов В.А., Разбицкий В.В., 2013. Варианты реализации безлюдных технологий для горнопромышленного транспорта. *Известия высших учебных заведений. Горный журнал*, № 1, С. 104 – 111.
14. Зырянов И.В., Ильбульдин Д.Х., Кондратюк А.П., 2016. Параметры системы дистанционного управления горнотранспортным оборудованием в условиях Удачинского ГОКа. *Горная промышленность*, № 5(129), С. 49 – 51.
15. Гусаков Г.Б., 2021. Перспективные направления развития техники БелАЗ. *Горная промышленность*, № 3, С. 44 – 47.
16. Гучек Е.М., Клебанов Д.А., 2017. Преимущества и возможности роботизированного карьерного самосвала БЕЛАЗ грузоподъемностью 130 т. *Золото и технологии*. № 4(38), С. 78 – 81.
17. Сергель А.Н., 2019. Карьерные самосвалы БЕЛАЗ на газовом топливе. *Горная промышленность*, № 5, С. 29 – 31.
18. Насковец А.М., Пархомчик П.А., Егоров А.Н. и др., 2018. Современное развитие карьерного транспорта производства ОАО "БЕЛАЗ". *Актуальные вопросы машиноведения*, Т. 7, С. 8 – 11.
19. Дубов Г.М., Трухманов Д.С., Чегошев А.А. и др., 2021. Разработка технических требований к криогенным бортовым топливным системам карьерных самосвалов БЕЛАЗ. *Горное оборудование и электромеханика*, № 6(158), С. 49 – 58. DOI 10.26730/1816-4528-2021-6-49-58.
20. Черепанов В.А. Журавлев А.Г., Глебов И.А., Чендырев М.А., 2019. Обзор транспорта с электропитанием в фокусе развития горнодобывающих предприятий. *Проблемы недропользования*, №1 (20), С. 33 – 49. DOI: 10.25635/2313-1586.2019.01.033.
21. Дубинкин Д.М., Карташов А.Б., Арутюнян Г.А. и др., 2020. Современное состояние техники и технологий в области карьерных самосвалов с накопителями энергии. *Горное оборудование и электромеханика*, № 6(152), С. 31 – 42. DOI 10.26730/1816-4528-2020-6-31-42.
22. Дубинкин Д.М., Пашков Д.А., Тургенев И.А., 2021. Аккумуляторные батареи для карьерных самосвалов на электрической тяге. *Современные тенденции и инновации в науке и производстве: Материалы X международной научно-практической конференции, Междуреченск, 22 апреля 2021 года*. Междуреченск: Кузбасский государственный технический университет имени Т.Ф. Горбачева, С. 1281 – 1289.
23. Нгуен Т.Х., Васильев Б.Ю., 2022. Анализ автономных роботизированных машин горного производства с автономными системами электродвижения. *Горное оборудование и электромеханика*, № 5(163), С. 59 – 69. DOI 10.26730/1816-4528-2022-5-59-69.

24. Грачев А.И., 2022. Абсолютно "зеленый" БЕЛАЗ-7558Е. *Горная промышленность*, № 2, С. 30 – 32.
25. Михеев А.В., Кострова З.А., Беляков В.В. и др., 2016. Анализ возможностей применения безвоздушных шин на автотракторной технике и сельхозмашинах. *Тракторы и сельхозмашины*, № 5, С. 21 – 26.
26. *Инновационное безвоздушное колесо радиальной конструкции для спецтехники MICHELIN® X® TWEEL® SSL*. URL: <https://media.michelin.ru/navi/innovacionnoe-bezvozdushnoe-koleso-radialnoy-konstrukcii-dlya-spectehniki-michelin-x-tweel-ssl/> (дата обращения: 24.10.2022).
27. *Особенности безвоздушных шин*. URL: <https://tires1.ru/bezvozdushnye-shiny/> (дата обращения: 24.10.2022).
28. *Устройство и классификация безвоздушных шин*. URL: <https://autolirika.ru/interesnoe/ustrojstvo-i-klassifikaciya-bezvozdushnyh-shin.html> (дата обращения: 24.10.2022).
29. *Безвоздушные шины Bridgestone Air Free*. URL: <https://koleso.ru/articles/bridgestone-bezvozdushnye-shiny-ne-trebujushhie-podkachki/> (дата обращения: 24.10.2022).
30. *Тою разработала новое поколение безвоздушных шин и скоро начнет серийно их производить*. URL: <https://1gai.ru/blog/live/519279-toyo-razrabotala-novoe-pokolenie-bezvozdushnyh-shin-i-skoro-nachnet-seriyno-ih-proizvodit.html> (дата обращения: 24.10.2022).
31. *Виды и маркировка цельнолитых шин: размеры, материал и кто выпускает?* URL: <https://russhina-k.ru/articles/vidy-i-markirovka-tselnolitykh-shin-razmery-material-i-cto-vypuskaet/> (дата обращения: 24.10.2022).
32. Патент № 167034 Российская Федерация, МПК В60С 7/18 (2006.01). *Автомобильная шина с упругими деформируемыми спицами*: № 2016128693/11 : заявл. 14.07.2016 : опубл. 20.12.2016. Михеев А.В., Кострова З.А., Беляков В.В., Макаров В.С., Зезюлин Д.В., Колотилин В.Е., Куркин А.А.
33. Патент № 2636635 Российская Федерация, МПК В60С 7/00 (2006.01). *Колесо с пневматиком в сборе*: № 2013146531 : заявл. 17.10.2013 : опубл. 24.11.2017. Корус Т.Д., Фреденбург М.
34. Патент № 2495759 Российская Федерация, МПК В60С 7/22 (2006.01). *Способ армирования автомобильных безвоздушных шин*: № 2012111574/11 : заявл. 26.03.2012 : опубл. 20.10.2013. Мазур В.В., Гайлиш А.В.
35. Патент № 2538472 Российская Федерация, МПК В60С 7/12 (2006.01). *Автомобильное колесо с безвоздушной шиной*: № 2013120165/11 : заявл. 30.04.2013 : опубл. 10.01.2015. Мазур В. В.
36. Мазур В.В., 2015. Повышение живучести военной автомобильной техники применением боестойких колёс и шин. *Вопросы оборонной техники. Серия 16: Технические средства противодействия терроризму*, № 1 – 2 (79 – 80), С. 109 – 115.
37. Чендырев М.А., 2019. Комплексная модель для обоснования параметров автомобильного карьерного подъемника. *Горный информационно-аналитический бюллетень*, № S37, С. 282 – 289. DOI 10.25018/0236-1493-2019-11-37-282-289.

References

1. Yakovlev V.L., Yakovlev V.A., 2017. Aktual'nye problemy kar'ernogo transporta i perspektivy ego razvitiya [Actual problems of quarry transport and prospects for its development]. *Problemy nedropol'zovaniya*, № 4(15), S. 5 – 9. DOI: <https://doi.org/10.18454/2313-1586.2017.04.005>
2. Potapov M.G. Belozarov V.I., 2000. Napravleniya razvitiya kar'ernogo avto-transporta [Directions of development of quarry vehicles]. *Gornyi informatsionno-analiticheskii byulleten'*, № 10, P. 31 – 32.
3. Kuleshov A.A., 2000. Osnovnye napravleniya povysheniya effektivnosti ka-

r'ernogo avtotransporta na sovremennom etape razvitiya otkrytykh gornykh rabot [Main directions of increasing the efficiency of quarry vehicles at the current stage of development of open-pit mining]. Gornyi informatsionno-analiticheskiy byulleten', № 1, P. 197 – 200.

4. Yakovlev V.L., 2019. Issledovanie perekhodnykh protsessov – novoe napravlenie v razvitiy metodologii kompleksnogo osvoeniya georesursov [Study of transients as a new direction of the complex development methodology of geo-resources]. Ekaterinburg, UrO RAN, 284 p.

5. Akishev A.N., Lel' Yu.I., Glebov I.A., 2019. Innovatsionnaya tekhnologiya vskrytiya i razrabotki glubokikh kimberlitovykh kar'erov [Innovative technology of opening and development of deep kimberlite quarries]. Izvestiya Tul'skogo gosudarstvennogo universiteta. Nauki o Zemle, № 3, S. 111 – 123. DOI 10.25635/IM.2019.87.37803.

6. Zhuravlev A.G., Chernykh V.V., 2022. Granichnye tekhniko-ekonomicheskie pokazateli primenimosti frontal'nykh pogruzchikov pri rabote v kachestve vyemochno-transportnykh mashin [Boundary technical and economic indicators of the applicability of front loaders when working as loading and transport machines]. Izvestiya Tomskogo politekhnicheskogo universiteta. Inzhi-niring georesursov, Vol. 333, № 5, P. 186 – 195. DOI 10.18799/24131830/2022/5/3500.

7. Glebov A.V., 2022. Kontseptsiya metodologii vzaimnoi adaptatsii avtomobil'no-konveiernogo transporta i razvivayushcheysya gornotekhnicheskoi sistemy kar'era [Methodology concept of mutual adaptation of the automotive conveyor transport and the developing mining system of a quarry]. Gornaya promyshlennost', № S1, P. 78 – 85. DOI 10.30686/1609-9192-2022-1S-78-85.

8. Zhuravlev A.G., Semenkin A.V., Cherepanov V.A. i dr., 2022. Zadachi razvitiya perspektivnykh tsiklichno-potochnykh tekhnologii dlya glubokikh kar'erov [Tasks of developing promising cyclic-flow technologies for deep quarries]. Gornaya promyshlennost', № S1, P. 53 – 62. DOI 10.30686/1609-9192-2022-1S-53-62.

9. Reshetnyak S.P., Avraamova N.S., 2022. Obosnovanie i realizatsiya ratsional'nykh tekhnologicheskikh skhem avtomobil'no-konveiernogo transporta skal'nykh gornykh porod dlya glubokikh kar'erov [Substantiation and implementation of rational technological schemes of automobile conveyor transport of rocky material for deep quarries]. Ratsional'noe osvoenie nedr, № 1(63), P. 32 – 39. DOI 10.26121/RON.2022.59.77.005.

10. Trubetskoi K.N., Ryl'nikova M.V., Klebanov D.A., Makeev M.A., 2017. Nauchno-tekhnicheskie voprosy izmeneniya organizatsii upravleniya otkrytymi gornymi rabotami s primeneniem robotizirovannoi kar'erno tekhniki [Scientific and technical issues of changing the organization of management of open-pit mining operations with the use of robotic quarry equipment]. Gornaya promyshlennost', № 5(135), P. 27 – 30.

11. Cherepanov V.A., 2020. K voprosu primeneniya avtopoezdov na gornykh rabotakh [On the issue of the use of road trains in mining]. Problemy nedropol'zovaniya, № 4(27), P. 73 – 88. DOI 10.25635/2313-1586. 2020.04.073.

12. Sobolev A.A., 2020. Analiz opyta primeneniya bespilotnykh kar'ernykh samosvalov [Analysis of the experience of using unmanned mining dump trucks]. Gornyi zhurnal, № 4, P. 51 – 55. DOI 10.17580/gzh.2020.04.10.

13. Tarasov P.I., Zhuravlev A.G., Cherepanov V.A., Razbitskii V.V., 2013. Varianty realizatsii bezlyudnykh tekhnologii dlya gornopromyshlennogo transporta [Options for the implementation of unmanned technologies for industrial mining transport]. Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedenii. Gornyi zhurnal, № 1, P. 104 – 111.

14. Zyryanov I.V., Il'bul'din D.Kh., Kondratyuk A.P., 2016. Parametry sistemy distantsionnogo upravleniya gornotransportnym oborudovaniem v usloviyakh Udachninskogo GOKa [Parameters of the remote control system for mining equipment in the conditions of Udachninsky GOK]. Gornaya promyshlennost', № 5(129), P. 49 – 51.

15. Gusakov G.B., 2021. Perspektivnye napravleniya razvitiya tekhniki BelAZ [Promising directions for the development of BelAZ technic]. Gornaya promyshlennost', № 3, P. 44 - 47.

16. Guchek E.M., Klebanov D.A., 2017. Preimushchestva i vozmozhnosti robotizirovannogo kar'ernogo samosvala BELAZ gruzopod'emnost'yu 130 t [Advantages and capabilities of the robotized BELAZ mining dump truck with a load capacity of 130 tons]. Zoloto i tekhnologii. № 4(38), P. 78 – 81.

17. Sergel' A.N., 2019. Kar'ernye samosvaly BELAZ na gazovom toplive [BELAZ quarry dump trucks on gas fuel]. Gornaya promyshlennost', № 5, P. 29 – 31.

18. Naskovets A.M., Parkhomchik P.A., Egorov A.N. i dr., 2018. Sovremennoe razvitiye kar'ernogo transporta proizvodstva OAO "BELAZ" [Modern development of quarry transport produced by BELAZ]. Aktual'nye voprosy mashinovedeniya, Vol. 7, P. 8 – 11.

19. Dubov G.M., Trukhmanov D.S., Chegoshchev A.A. i dr., 2021. Razrabotka tekhnicheskikh trebovaniy k kriogennym bortovym toplivnym sistemam kar'ernykh samosvalov BELAZ [Development of technical requirements for cryogenic on-board fuel systems of BELAZ dump trucks]. Gornoe oborudovanie i elektromekhanika, № 6(158), P. 49 – 58. DOI 10.26730/1816-4528-2021-6-49-58.

20. Cherepanov V.A. Zhuravlev A.G., Glebov I.A., Chendyrev M.A., 2019. Obzor transporta s elektropitaniem v fokuse razvitiya gornodobyvayushchikh predpriyatii [Overview of transport with electric power supply in the focus of development of mining enterprises]. Problemy nedropol'zovaniya, №1 (20), P. 33 – 49. DOI: 10.25635/2313-1586.2019.01.033.

21. Dubinkin D.M., Kartashov A.B., Arutyunyan G.A. i dr., 2020. Sovremennoe sostoyaniye tekhniki i tekhnologii v oblasti kar'ernykh samosvalov s nakopitel'yami energii [The current state of equipment and technologies in the field of mining dump trucks with energy storage]. Gornoe oborudovanie i elektromekhanika, № 6(152), P. 31 – 42. DOI 10.26730/1816-4528-2020-6-31-42.

22. Dubinkin D.M., Pashkov D.A., Turgenev I.A., 2021. Akkumulyatornye batarei dlya kar'ernykh samosvalov na elektricheskoi tyage [Rechargeable batteries for electric-powered dump trucks]. Sovremennyye tendentsii i innovatsii v nauke i proizvodstve: Materialy Kh mezhdnarodnoi nauchno-prakticheskoi konferentsii, Mezhdurechensk, 22 aprelya 2021 goda. Mezhdurechensk: Kuzbasskii gosudarstvennyi tekhnicheskii universitet imeni T.F. Gorbacheva, P. 1281 – 1289.

23. Nguen T.Kh., Vasil'ev B.Yu., 2022. Analiz avtonomnykh robotizirovannykh mashin gornogo proizvodstva s avtonomnymi sistemami elektrodvizheniya [Analysis of autonomous robotic mining machines with autonomous electric moving systems]. Gornoe oborudovanie i elektromekhanika, № 5(163), P. 59 – 69. DOI 10.26730/1816-4528-2022-5-59-69.

24. Grachev A.I., 2022. Absolyutno "zelenyi" BELAZ-7558E [Absolutely "green" BELAZ-7558E]. Gornaya promyshlennost', № 2, P. 30 – 32.

25. Mikheev A.V., Kostrova Z.A., Belyakov V.V. i dr., 2016. Analiz vozmozhnostei primeneniya bezvozdushnykh shin na avtotraktornoi tekhnike i sel'khoz mashinakh [Analysis of possibilities of using airless tires on automotive equipment and agricultural machines]. Traktory i sel'khoz mashiny, № 5, P. 21 – 26.

26. Innovatsionnoye bezvozdushnoye koleso radial'noi konstruktsii dlya spetsial'noy tekhniki MICHELIN® X® TWEEL® SSL [Innovative radial airless wheel for special equipment MICHELIN® X® TWEEL® SSL]. URL: <https://media.michelin.ru/navi/innovatsionnoe-bezvozdushnoe-koleso-radialnoy-konstruktsii-dlya-spectekhniki-michelin-x-tweel-ssl/> (data obrashcheniya: 24.10.2022).

27. Osobennosti bezvozdushnykh shin [Features of airless tires]. URL: <https://tires1.ru/bezvozdushnye-shiny/> (data obrashcheniya: 24.10.2022).

28. Ustroystvo i klassifikatsiya bezvozdushnykh shin [Structure and classification of airless tires]. URL: <https://autolirika.ru/interesnoe/ustrojstvo-i-klassifikatsiya-bezvozdushnyh-shin.html> (data obrashcheniya: 24.10.2022).

29. Bezvozdushnye shiny Bridgestone Air Free [Bridgestone Air Free airless tires]. URL: <https://koleso.ru/articles/bridgestone-bezvozdushnye-shiny-ne-trebuyushhie-podkacki/> (data obrashcheniya: 24.10.2022).

30. Toyo razrabotala novoe pokolenie bezvozdushnykh shin i skoro nachnet seriino ikh proizvodit' [Toyo has developed a new generation of airless tires and will soon begin mass-producing them]. URL: <https://1gai.ru/blog/live/519279-toyo-razrabotala-novoe-pokolenie-bezvozdushnyh-shin-i-skoro-nachnet-seriyno-ih-proizvodit.html> (data obrashcheniya: 24.10.2022).

31. Vidy i markirovka tsel'nolitykh shin: razmery, material i kto vypuskaet? [Types and marking of solid tires: dimensions, material and manufacturers?] URL: <https://russhina-k.ru/articles/vidy-i-markirovka-tselnolitykh-shin-razmery-material-i-kto-vypuskaet/> (data obrashcheniya: 24.10.2022).

32. Patent № 167034 Rossiiskaya Federatsiya, MPK B60C 7/18 (2006.01). Avtomobil'naya shina s uprugimi deformiruemymi spitsami [Patent No. 167034 Russian Federation, MPK VB60S 7/18 (2006.01). Automobile tire with elastic deformable spokes]: № 2016128693/11: zayavl. 14.07.2016 : opubl. 20.12.2016. Mikheev A.V., Kostrova Z.A., Belyakov V.V., Makarov V.S., Zezyulin D.V., Kolotilin V.E., Kurkin A.A.

33. Patent № 2636635 Rossiiskaya Federatsiya, MPK B60C 7/00 (2006.01). Koleso s pnevmatikom v sbore [Patent No. 2636635 Russian Federation, MPK V60S 7/00 (2006.01). Wheel with pneumatic assembly]: № 2013146531 : zayavl. 17.10.2013 : opubl. 24.11.2017. Korus T. D., Fredenburg M.

34. Patent № 2495759 Rossiiskaya Federatsiya, MPK B60C 7/22 (2006.01). Sposob armirovaniya avtomobil'nykh bezvozdushnykh shin [Patent No. 2495759 Russian Federation, MPK V60S 7/22 (2006.01). Method of reinforcement of automobile airless tires]: № 2012111574/11 : zayavl. 26.03.2012 : opubl. 20.10.2013. Mazur V.V., Gailish A.V.

35. Patent № 2538472 Rossiiskaya Federatsiya, MPK B60C 7/12 (2006.01). Avtomobil'noe koleso s bezvozdushnoi shinoi [Patent No. 2538472 Russian Federation, MPK V60S 7/12 (2006.01). Automobile wheel with airless tire]: № 2013120165/11 : zayavl. 30.04.2013 : opubl. 10.01.2015. Mazur V. V.

36. Mazur V.V., 2015. Povyshenie zhivuchesti voennoi avtomobil'noi tekhniki primeneniem boestoikikh koles i shin [Increasing the survivability of military automotive technology by using bullet-proof wheels and tires]. Voprosy oboronnoi tekhniki. Seriya 16: Tekhnicheskie sredstva protivodeistviya terrorizmu, № 1 – 2 (79 – 80), P. 109 – 115.

37. Chendyrev M.A., 2019. Kompleksnaya model' dlya obosnovaniya parametrov avtomobil'nogo kar'ernogo pod"emnika [A comprehensive model for substantiating the parameters of an automobile quarry lifter]. Gornyi informatsionno-analiticheskii byulleten', № S37, P. 282 – 289. DOI 10.25018/0236-1493-2019-11-37-282-289.