

ПРИМЕНЕНИЕ КОНВЕЙЕРНЫХ ПОЕЗДОВ КАК ВНЕШНЕГО ТРАНСПОРТА ОБОГАТИТЕЛЬНЫХ ПРЕДПРИЯТИЙ

И.С. Труфанова¹, Д.Н. Невзоров¹

¹ Санкт-Петербургский горный университет, Санкт-Петербург, Россия,
e-mail: Trufanova_IS@pers.spmi.ru

Аннотация: За последние несколько десятилетий энергопотребление современных ленточных конвейеров значительно снизилось. Несмотря на то, что были проведены обширные исследования в области производства энергоэффективных ленточных конвейеров, остаются значительные возможности для дальнейшего снижения энергопотребления, особенно при рассмотрении тяжело-нагруженных или длинных наземных ленточных конвейеров. Существует технология, которая объединяет преимущества, как ленточных конвейеров, так и железнодорожного транспорта, создавая высокоэффективную и экономичную систему транспортировки сыпучих материалов, известную как конвейерный поезд. Представлен мировой опыт эксплуатации различных видов транспорта, в особенности конвейерных поездов и ленточных конвейеров. Конвейерный поезд – это система непрерывной транспортировки сыпучих материалов, которая благодаря железным колесам, движущимся по стальным рельсам, имеет сопротивление качению, аналогичное по величине железнодорожным системам. Новая разработка обеспечивает инновационный отход от традиционных систем транспортировки сыпучих материалов со значительными энергетическими и экономическими выгодами. Результаты показывают, что конвейерные поезда имеют ряд нерешенных задач по направлениям экономичности, энергоэффективности, маршрутизации и оптимальной конструкции, однако данный вид транспорта имеет больше преимуществ по сравнению с локомотивной откаткой за счет наименьшего энергопотребления и уменьшенного штата сотрудников.

Ключевые слова: конвейерный поезд, эффективность, локомотивная откатка, внешний транспорт, автоматизация, промежуточный привод, фрикционный привод, рейл-вейор.

Для цитирования: Труфанова И. С., Невзоров Д. Н. Применение конвейерных поездов как внешнего транспорта обогатительных предприятий // Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2023. – № 9-1. – С. 64–78. DOI: 10.25018/0236_1493_2023_91_0_64.

The use of conveyor trains as external transport for enrichment enterprises

I.S. Trufanova¹, D.N. Nevzorov¹

¹ Saint-Petersburg Mining University, Saint-Petersburg, Russia, e-mail: Trufanova_IS@pers.spmi.ru

Abstract: Over the past few decades, the energy consumption of modern conveyor belts has decreased significantly. Although extensive research has been conducted into the production of energy-efficient belt conveyors, there remains significant scope for further reduction of energy consumption, especially when considering heavily loaded or long ground belt conveyors.

There is a technology that combines the advantages of both belt conveyors and rail transport, creating a highly efficient and economical system for transporting bulk materials, known as a conveyor train. This article presents the world experience of operating various types of transport, especially conveyor trains and conveyor belts. A conveyor train is a system of continuous transportation of bulk materials, which, thanks to iron wheels moving on steel rails, has rolling resistance similar in magnitude to railway systems. The new development provides an innovative departure from traditional bulk materials transportation systems with significant energy and economic benefits. The results show that conveyor trains have a number of unsolved problems in the areas of economy, energy efficiency, routing and optimal design, however, this type of transport has more advantages compared to locomotive rolling due to the lowest energy consumption and reduced staff.

Key words: conveyor train, efficiency, locomotive haulage, external transport, automation, intermediate drive, friction drive, railveyor.

For citation: Trufanova I. S., Nevzorov D. N. The use of conveyor trains as external transport for enrichment enterprises. *MIAB. Mining Inf. Anal. Bull.* 2023;(9-1):64-78. [In Russ]. DOI: 10.25018/0236_1493_2023_91_0_64.

Введение

Во всем мире сотни миллиардов тонн сыпучих материалов ежегодно перевозятся на многие километры. Расстояния транспортировки значительно варьируются в зависимости от эксплуатационных требований; при этом большая часть сыпучего материала транспортируется на многие десятки или даже сотни километров от шахт до перерабатывающих заводов, электростанций или экспортных терминалов. Выбор системы транспортирования сыпучих материалов зависит от дальности транспортирования, пропускной способности и рельефа местности, и почти во всех случаях решение отдается в пользу ленточных конвейеров в сочетании с самосвалами и/или железнодорожным транспортом [1, 2].

Цель данной статьи — обосновать актуальность внедрения систем конвейерных поездов, как современного вида транспорта. Задачи:

- определить нерешенные научные проблемы по данному направлению;
- предложить решения существующих проблем.

Растущие цены на ископаемое топливо и необходимость снижения выбросов парниковых газов в сочетании с увеличивающимся спросом на полезные ископаемые оказали значительное влияние на максимизацию эффективности и экономичности систем транспортировки сыпучих материалов. Ленточные конвейеры, являющиеся транспортом непрерывного действия, имеют значительные экономические и эксплуатационные преимущества [3]. Значительные достижения в области проектирования и конструирования ленточных конвейеров с низким сопротивлением движению привели к снижению энергопотребления, что приводит к тому, что установки становятся все более длинными и экономичными, конкурируя с железнодорожным транспортом [4].

На рис. 1 показано постепенное увеличение длины однопролетных ленточных конвейеров с 1980 г., при этом уже планируются ленточные конвейеры длиной более 30 км. Самым длинным однопролетным наземным ленточным конвейером в мире в настоящее время яв-

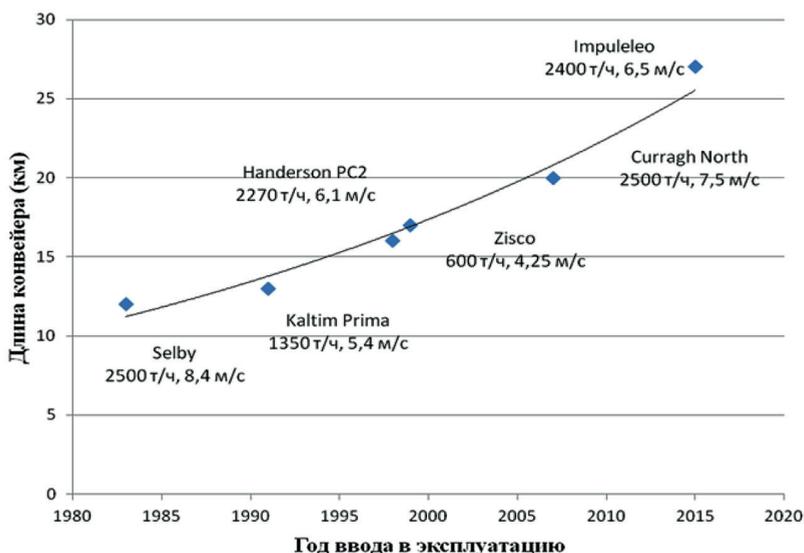


Рис. 1. Длина ленточных конвейеров на мировом опыте [5]

Fig. 1. The length of belt conveyors on the world experience [5]

ляется наземный конвейер Impumelelo в Южной Африке. Эта конкретная система была введена в эксплуатацию в 2015 г., ее длина составляет 26,7 км, и она транспортирует уголь из шахты на завод Sasol's по производству синтетического топлива в Секунде с проектной производительностью 2400 т/ч.

Относительная эффективность каждой из основных систем транспортирования сыпучих материалов отражена в коэффициенте потерь при транспортировке, рассчитанном Jonkers [6] и показанном на рис. 2. Здесь основные системы транспортирования сыпучих материалов разделены на транспорт непрерывного

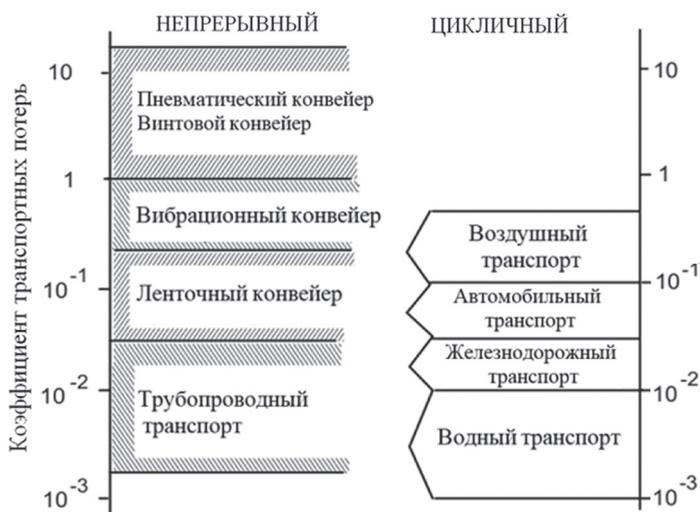


Рис. 2. Коэффициент транспортных потерь для систем перевозки сыпучих материалов [6]

Fig. 2. Transport loss coefficient for bulk materials transportation systems [6]

и циклического действия и четко показаны преимущества железнодорожного транспорта перед автотранспортом и автосамосвалов перед ленточными конвейерами.

Из-за присущего транспортировке износа конструкции при движении, сопротивление качению ленточного конвейера, как правило, больше, чем у грузовых автомобилей и железнодорожного транспорта. Износ конструкции при движении ленты эффективно ограничивают рабочую длину и экономическую эффективность обычных наземных конвейеров [7].

Исследования Саксби и Элкинга показали, что ленточные конвейеры более экономичны с точки зрения затрат на весь жизненный цикл, чем автомобильный и железнодорожный транспорт, при производительности до 5 млн т/год на расстояниях транспортировки до 40 км по горизонтали. Это исследование дополнительно подтверждается Галлиганом, где на рис. 3, а показано соотношение капитальных и эксплуатационных затрат на железнодорожный транспорт, наземный ленточный конвейер и автосамосвалы

[7]. В то время как удельные капитальные затраты на километр при внедрении железнодорожного транспорта больше, чем на ленточные конвейеры и автотранспорт, удельные эксплуатационные расходы на тонну при железнодорожных перевозках меньше. А это означает, что по мере увеличения расстояния транспортирования более высокие первоначальные капитальные вложения компенсируются более низкими эксплуатационными расходами. Это показано на рис. 3, б, где демонстрируется экономическая выгода железнодорожного транспорта для перевозок на большие расстояния. Очевидно, что сравнительные эксплуатационные расходы в том числе в значительной степени зависят от потерь материала при транспортировке, при этом затраты на инфраструктуру постепенно перевешиваются снижением энергозатрат в результате снижения трения качения.

Поскольку новые месторождения полезных ископаемых располагаются дальше от существующих перерабатывающих заводов, электростанций и портов, транспортировка сыпучих материалов

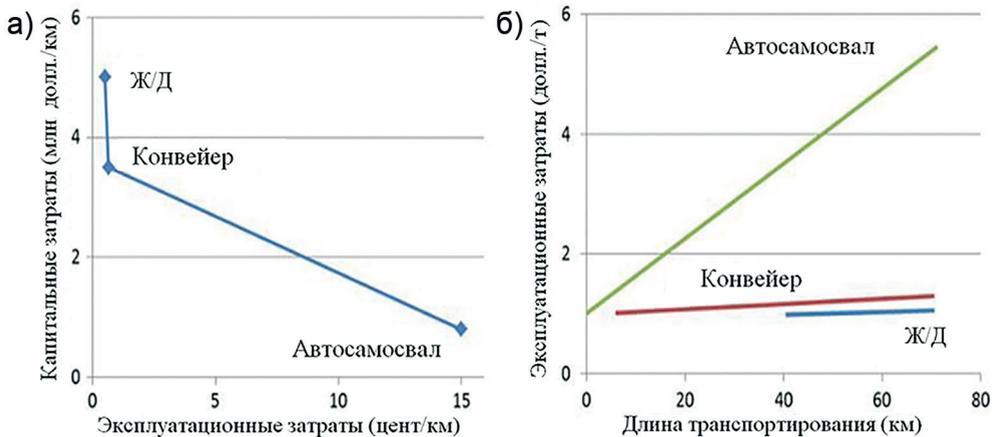


Рис. 3. Анализ затрат на автомобильный, железнодорожный транспорт и наземные ленточные конвейеры: зависимость капитальных и эксплуатационных затрат (а); зависимость эксплуатационных затрат от длины транспортирования (б) [7]

Fig. 3. Cost analysis for road, rail transport and ground conveyor belts: dependence of capital and operating costs (a); dependence of operating costs on the length of transportation (b) [7]

на большие расстояния становится неизбежной для многих наиболее важных отраслей промышленности. Будущие системы транспортировки сыпучих материалов на большие расстояния должны быть не только экономически эффективными, но и высокоэффективными с точки зрения энергопотребления, поскольку снижение энергоемкости операций является ключевой целью для всех мировых добывающих компаний. Ограничением для обычных ленточных конвейеров является взаимодействие между резиновыми обкладками ленты и неработающими роликами, что означает, что эффективность железнодорожного транспорта никогда не будет соответствовать системам, поддерживаемым с помощью обычных роликов.

С учетом этих целей и ограничений была разработана новая система транспортирования сыпучих материалов непрерывного действия по железной дороге. Новая технология получила удачное название конвейерный поезд благодаря сочетанию технологии железнодорожного транспорта и ленточного конвейера [8, 9].

Методика и методы

На эффективность перехода на новые схемы транспортирования [10] в условиях работающего предприятия оказывают влияние следующие основополагающие факторы:

- возможность обеспечения бесперебойной работы эксплуатируемой транспортной схемы в период строительства новой;
- максимальное использование инфраструктуры существующего транспортного комплекса рудника после ее усовершенствования;
- минимальные капитальные затраты, связанные со строительством новых транспортных выработок и приобретением необходимого оборудования.

Преимущества конвейерных поездов заключаются [11] в следующем:

1. Создание непрерывности движения.
2. Горная масса может транспортироваться на любое расстояние с любой конфигурацией трассы и в любое место назначения без перегрузки.
3. Возможность быстрого изменения направления путей при ремонте транспортного оборудования, что важно в условиях быстрого изменения конфигурации путей в карьерах и шахтах с увеличением глубины разработки и высокой динамикой горных работ.
4. Система управления конвейерным поездом адаптирована к централизации и полной автоматизации.
5. Конвейерный поезд может не только транспортировать руду и породу, но и доставлять материалы, оборудование и людей.
6. Высокая производительность системы обеспечивается большим и переменным регулированием скорости движения (до 60 км/ч), количества поездов и секции вагонов.
7. Система конвейерных поездов имеет накопительную емкость. В случаях временного прекращения приема груза на разгрузочных станциях в нем может скапливаться груз. Последующая подача этих поездов к месту разгрузки снижает потери во времени при неравномерном потоке грузов.

К недостаткам конвейерных поездов можно отнести:

1. Относительная сложность технологии приводов, как внешний, так и независимый [12].
2. Высокий шум и вибрация при больших скоростях транспортирования.
3. Сложность монтажа пунктов разгрузки и большие экономические затраты на них.

Важно отметить, что конвейерный поезд, помимо своих хороших эксплуа-

тационных характеристик, обладает достаточно высокими экономическими показателями, которые могут значительно превышать эти показатели на других видах транспорта [13].

Однако существует и целый спектр нерешенных на данный момент проблем. Рассмотрим их более подробно.

Шум и вибрация при движении

В настоящее время исследования и разработки системы рельсовых конвейеров все еще находятся на начальной стадии, и нет исследовательской литературы по вибрации и шуму рельсовых конвейеров в стране и за рубежом. Исследования шума от колесных пар в основном сосредоточены на области шума при железнодорожном транспорте. Тема нерешенной проблемы является: шум колесных пар, аэродинамический шум, контроль вибрации и шума, взаимодействие колесных рельсов, численное моделирование и эксперимент, измерение вибрации и шума. В 1976 г. П.Дж. Ремингтон разработал модель прогнозирования шума качения. С точки зрения взаимодействия колеса с рельсом был всесторонне объяснен механизм генерации шума качения колеса и рельса, и была создана модель прогнозирования шума качения колеса и рельса. После этого Д.Дж. Томпсон из Соединенного Королевства улучшил модель прогнозирования шума качения на основе П.Дж. Ремингтона, рассмотрел более полную взаимосвязь контакта колеса с рельсом, использовал модель конечных элементов для анализа высокочастотной вибрации колеса и не игнорировал возмущения колеса и заменили модель балки Эйлера моделью балки Тимошенко, чтобы лучше отразить характеристики высокочастотной вибрации рельса [14]. Результаты, предсказанные программным обеспечением модели, в основном согласуются с большинством полевых

измерений. Это удобный инструмент для оценки шума колесных рельсов, изучения снижения вибрации и шума колесных рельсов, а также для руководства проектированием железных дорог в Европе и Америке [15].

Связь между скоростью транспортного средства и уровнем звукового давления выведена И.Л. Ве. В качестве объектов взяты модели возбуждения износа колес и различных рельсовых стыков. В 2002 г. В.Х. Ву и Д.Дж. Томпсон ввел эквивалентные параметры спектра шероховатости в программное обеспечение для моделирования TWINS, чтобы смоделировать силу колесной пары и рассчитать ее шум [16]. Стефанелли, основываясь на исследованиях Томпсона, рассчитал форму колеса с осесимметричными характеристиками, используя метод анализа модели конечных элементов, и подтвердил, что собственная частота колеса будет изменяться при изменении собственных параметров колеса, таких как радиус колеса, масса, толщина ступицы и другие размеры, Cigada применил метод двумерных граничных элементов для анализа колеса с различными параметрами, и было указано, что на характеристики вибрации и звукового излучения колеса влияет положение точки контакта колеса с рельсом, а формы колебаний колеса были разными при разных положениях контакта. Что касается оптимизации параметров пути, Н. Винсент и соавторами предложены меры по снижению общего акустического шума рельса за счет изменения жесткости рельсовой подкладки. На основе прототипа рельсового конвейера, разработанного совместно Libo Heavy Industry Technology Co., Ltd. и Ньюкаслским университетом, в этой статье проводятся полевые испытания на вибрацию и шум. Путем сбора и анализа экспериментальных данных изучается влияние разной скорости ленты,

разного расстояния между колесами, разных материалов колес небольших автомобилей на шум, а также предлагаются методы исследования и меры по снижению вибрации и шума системы [16].

Исследования тягового линейного двигателя

Тяговые линейные двигатели в конвейерных поездах работают по принципу создания электромагнитного поля между поездом и рельсами. При активации двигателя создается электромагнитное поле, которое взаимодействует с рельсами и обеспечивает движение поезда. За счет отсутствия механических передач или промежуточных звеньев, тяговые линейные двигатели обеспечивают более плавное и эффективное движение поезда [17].

Использование тяговых линейных двигателей в горных конвейерных системах предлагает ряд преимуществ. Во-первых, они обеспечивают высокую эффективность и экономию энергии благодаря отсутствию механических передач и трения. Это позволяет сократить затраты на энергию и снизить воздействие на окружающую среду [18, 19].

Применение тяговых линейных двигателей в открытых горных работах уже демонстрирует значительные результаты в повышении эффективности и производительности. Например, одно исследование показало, что использование тяговых линейных двигателей в конвейерных поездах привело к сокращению времени перемещения материалов на 20% и снижению энергопотребления на 15% [19].

Однако внедрение тяговых линейных двигателей в системы конвейерных поездов также сталкивается с рядом вызовов. Одной из основных проблем является высокая стоимость установки и обслуживания таких систем. Кроме того, необходимо также принимать во вни-

мание особенности горных работ, такие как высокая пыльность и влажность, которые могут повлиять на работу тяговых линейных двигателей [20, 21].

Несмотря на вызовы и проблемы, тяговые линейные двигатели представляют большой потенциал для горной промышленности. Новые технологии и материалы позволяют снизить стоимость и повысить надежность таких систем. Более того, исследования и разработки в области тяговых линейных двигателей продолжаются, что открывает новые возможности для повышения эффективности и производительности в горной промышленности.

Управление тягового линейного двигателя

Управление линейно-индукционным двигателем представляет очень большую трудность из-за сложности ограничения скорости бегущего магнитного поля, т.к. линейный индукционный двигатель повторяет по своим характеристикам асинхронный двигатель с короткозамкнутым ротором.

Ротором служит алюминиевая пластина, прикрепляемая под оси кареток конвейерного поезда.

За счет бегущего магнитного поля, создаваемого в статоре при подаче напряжения, алюминиевая пластина — ротор приобретает скорость несколько меньшую за счет скольжения. Но для нормальных скоростей перемещения поездов необходимы линейные скорости на 2–3 порядка меньше тех, которые создает бегущее магнитное поле статора линейного индукционного двигателя.

Так, например, для погрузочно-разгрузочных работ скорость движения поезда не должна превышать 0,3 м/с, а на ровных участках она может достигать 7 м/с. Изменение скорости асинхронного двигателя с короткозамкнутым ротором возможно тремя величинами:

напряжением, частотой и количеством полюсов. Наиболее перспективным является регулирование напряжением.

Тем самым нерешенной проблемой является методика управления приводом. Существует достаточно статей и работ по этой теме, но не все подходят под условия рудника и конвейерного поезда компании Rail-Veyor [22].

Устойчивость конвейерных поездов

Конвейерный поезд может быть использован как одно из решений для транспортировки угольной продукции. Эта система альтернативна традиционной транспортной системе: ленточному конвейеру, поезду, автосамосвалу и т.д. И оценивается она конкурентоспособными капитальными вложениями и эксплуатационными затратами. Одна из железнодорожных транспортных компаний Индонезии намерена разработать систему Rail-Conveyor с использованием местных запасов материалов и несколькими модификациями для компромисса по требованиям дизайна [23]. Разработанная система была вдохновлена продуктом Rail-Veyor из Канады. Система конвейерного поезда должна быть изменена под инфраструктуру индонезийской угольной промышленности и возможности местной обрабатывающей фабрики [24, 25].

Необходимо провести анализ устойчивости новой конструкции рельсового конвейера, который будет применяться в Российской Федерации.

В статье [26] проводится анализ устойчивости вагонетки конвейерного поезда, который основан на исследованиях, таких как статический анализ, требования к тяговой и эксплуатационной системе, требования к электростанции, требования к системе управления V.

Но для полной картины необходимо провести исследование стабильности для

определения максимального ускорения, замедления, рабочей скорости для всех возможных условий, таких как наклон, уклон и поворот с определенным радиусом.

Продольная неустойчивость может возникнуть при ускорении вагона на уклоне или замедлении на склоне, на котором одна колесная пара не касается рельс [27]. Это явление вызвано силой инерции, которая преобладает над другими рабочими силами. Чтобы предотвратить сход рельсов в продольном направлении, сила инерции должна быть уменьшена на величину ускорения при движении вагона по наклонным склонам или замедление движения вагона по спускам. Определяется максимально допустимое ускорение, замедление или скорость из схемы свободного кузова вагона.

Автоматизация горного производства

Для преодоления недостатков традиционных методов транспортирования полезных ископаемых, таких как чрезмерное потребление ресурсов, плохая операционная среда, низкая эффективность производства, высокие риски для опасности, высокие производственные затраты и сильное загрязнение, необходимо разработать интеллектуальную технологию добычи полезных ископаемых, подземных рудников, что обеспечивает полную безопасность, защиту окружающей среды и эффективность [28, 29]. Некоторые страны разработали и проделали большую работу в области интеллектуальной добычи полезных ископаемых на подземных рудниках на протяжении многих лет, и, таким образом, имеют значительный опыт в этой области. В начале XXI в. Канада, Финляндия, Швеция и другие развитые страны планировали интеллектуальную и беспилотную добычу полезных ископаемых. Шахта Стоби, принадлежащей

International Nickel Company of Canada, Ltd., является типичным примером такого автоматизированного рудника. Такие устройства, как скреперы, перфораторы и подземные карьерные самосвалы, управляются удаленно, и рабочие могут управлять оборудованием непосредственно из центральной диспетчерской на поверхности [30, 31].

Для внедрения конвейерных поездов в горной промышленности важную роль играет диспетчеризация транспортно-го процесса на предприятии. В задачи автоматизации входят такие этапы как процесс перемещения, загрузки выгрузки горной массы. Чтобы влиять на процесс движения поезда необходимо автоматическое управление приводными станциями для наибольшей эффективности за счет плавных пусков и торможений на всем протяжении трассы [32, 33].

Результаты

Основываясь на приведенном выше материале, мы можем сделать следующие предложения по теме конвейерных поездов:

1. Необходимо провести анализ мирового опыта использования таких поездов с целью возможности практически полностью заменить железнодорожный, конвейерный и автомобильный транспорт, которые являются основными видами транспорта.

2. Конвейерные поезда обладают значительными экономическими преимуществами перед другими видами транспорта, обеспечивающими снижение на 10 – 15% суммы финансовых затрат на осуществление транспортных операций, а их экономическая эффективность возрастает с увеличением дальности транспортировки. Следовательно, для опытного внедрения нужна методика экономического расчета капитальных и эксплуатационных затрат.

3. Принять конструктивные решения по адаптации конвейерного поезда к условиям горнодобывающих предприятий Российской Федерации.

4. Необходимо провести работу по определению технико-экономической эффективности применения конвейерного поезда в конкретных условиях карьеров и шахт [34].

5. Разработать методику тягового и эксплуатационного расчета при движении конвейерного поезда на горном предприятии. Составить алгоритм быстрого решения данной задачи с автоматическим определением количества приводных станций, мощности привода, количества тележек и коэффициент загрузки.

6. Для высокопроизводительных рудников с минимальным количеством транспортных выработок будет необходима система маршрутизации для транспорта груза. Разработать несколько видов цикла движения конвейерного поезда по горизонтам откатки.

Обсуждение результатов

Как уже говорилось, одним из главных элементов всей системы является приводная станция конвейерного поезда. Для ее проектирования нужны исходные данные, такие как производительность, масса поезда, траектория трассы с вертикальными и горизонтальными уклонами и коэффициент сцепления шины с продольной балкой [35, 36, 38].

Можно взять за основу патент [37] (Р.М. Зайцев и И.Ф. Чемерис), который в наибольшей степени является эффективным для всех условий проектирования. Энергозатраты играют большую роль при проектировании транспортной системы, и авторы пытаются снизить расход электроэнергии любыми способами. Цель снижения электроэнергии может быть достигнута тем, что приводы конвейерного поезда предлагается снабдить контактором и реле мак-

симального тока с замыкающими контактами. Причем замыкающие контакты контактора включить параллельно в цепь питания обмотки электромагнита, а в цепь катушки контактора включить последовательно размыкающий контакт пусковой кнопки и размыкающий контакт реле максимального тока, катушка которого включена в одну из фаз статора электродвигателя. При работе приводной станции при такой схеме будут снижаться затраты электроэнергии на транспортирование [39, 40].

На производительность непрерывного вида транспорта напрямую влияет степень заполнения поперечного сечения грузонесущего органа. При увеличении показателя поперечного сечения необходимо следить за тем, чтобы масса и габариты транспортируемого органа не изменялись [41]. Оптимизация в этой области не только повышает эффективность, но и минимизирует капитальные затраты за счет рационального подбора оборудования [42]. Традиционные ленточные конвейеры используют конфигурацию желобов с тремя роликами, которые образуют трапецевидное поперечное сечение с параболической надстройкой.

Тележки конвейерного поезда имеют поперечное сечение прямоугольника с довольно сильно скругленными нижними углами и параболической надстройкой. Исходя из этого, предлагается подобрать наиболее подходящее поперечное сечение для транспортного сосуда с наименьшим изменением геометрических размеров (высоты, ширины, длины) и наименьшей массы вагонетки.

Конечными точками в цикле транспортирования горной массы являются пункт загрузки и пункт разгрузки. Конструкция этих пунктов влияет на скорость погрузки и разгрузки конвейерного поезда. Для более скоростной загрузки поезд должен не останавливаться

при выгрузке горной массы и двигаться с наибольшей возможной скоростью. Пункт разгрузки должен выглядеть таким образом, чтобы после опорожнения сосуда двигались сразу в сторону загрузки без маневровых операций и это возможно с помощью петли разгрузки. Петли разгрузки могут быть на 180° и 360° в зависимости от направления в сторону погрузки. Пункт погрузки должен быть оснащен управляемым ленточным или скребковым транспортером для погрузки в тележки конвейерного поезда. Транспортер может находиться под бункером или рудоспуском и сгружать горную массу на поезд. Скорость движения поезда и движения ленты транспортера должны быть синхронизированы для наибольшей эффективности заполнения и управляться с поста диспетчера [43, 44].

При загрузке конвейерного поезда рудой непосредственно из рудника, без предварительной ее сушки, первая порция руды входит в контакт с днищем грузонесущего полотна поезда. Первоначальный слой горной массы, испытывая давление со стороны следующих порций, уплотняется, пространство между кусками породы заполняется более мелкой фракцией и это вместе с повышенным содержанием влаги в руде создает условия для смерзания и прилипания руды к днищу кузова транспортного средства [45]. Полезное сечение для загрузки уменьшается, что влияет на производительность. Коэффициент тары увеличивается за счет того, что количество горной массы, помещаемой на грузонесущий орган, уменьшается. При этом при движении поезда необходимо осуществлять очистку грузонесущего органа [46, 47].

Полная или частичная автоматизация транспортного процесса играет важную роль, так как она позволяет решить ряд проблем, таких как травматизм, сниже-

ние производительности, эффективность загрузки и разгрузки. Автоматизировать процесс транспортирования конвейерными поездами намного проще, так как они движутся по рельсовым путям, и возможность столкновения с препятствиями фактически сводится к нулю. В этой области важно получить 3D модель карты местности и потенциальный путь транспортного средства, чтобы спланировать безопасную траекторию [48].

Для внедрения системы автоматического управления на систему конвейерных поездов необходимо снабдить датчиками все важные элементы, такие как приводная станция, колесная пара, транспортер погрузки и переднюю тележку радарными и лидарами. На предприятии должна присутствовать общая система диспетчеризации и автоматизации, которая позволит управлять кон-

вейерным поездом. Место управления и мониторинга будет находиться удаленно на поверхности. Такая система позволит увеличить производительность, надежность оборудования и снизит экономические затраты.

Заключение

С учетом описанных выше проблем и путей их решения внедрение систем конвейерных поездов на отечественные предприятия горнодобывающей отрасли, в том числе в качестве внешнего транспорта обогатительных фабрик, можно считать актуальной задачей, требующей внимания профильных специалистов. Системы конвейерных поездов могут стать инновационной альтернативой существующим и широко распространенным видам транспорта горного производства.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Громов Е. В. Анализ современного состояния и перспектив развития магистрально-шахтного транспорта при глубокой добыче полезных ископаемых // Международная междисциплинарная научная геоконференция по геодезической съемке и управлению экологией горных работ, SGEM. — 2018. — Т. 18. — № 1.3. — С. 63–70. DOI: 10.5593/SGEM2018/1.3/S03.009.

2. Громов Е. В. Обоснование возможности реконструкции подземной транспортной схемы рудника при переходе на перспективные способы транспортирования руды (на примере гор. +170 м Кукисвумчоррского месторождения) // Проблемы недропользования. — 2017. — Т. 12. — № 1. — С. 37–47. DOI: 10.18454/2313-1586.2017.01.038.

3. Яковлев В. Л., Береснев В. А., Глебов А. В., Маринин М. А. Выбор схем циклических и непрерывных технологических процессов для глубоких карьеров открытым способом // Журнал горной науки. — 2019. — Т. 55. — № 5. — С. 783–788. DOI: 10.1134/S106273911905615X.

Литературу с п. 4 по п. 6 смотри в REFERENCES.

7. Исмагилов Р. И., Козуб А. В., Бадтиева Б. П., Павлович Б. П. Внедрение мониторинга безопасности на участке строительства крутонаклонного конвейерного комплекса на южном карьере Михайловского ГОКа // Горная промышленность. — 2020. — № 1. — С. 120–126. — DOI: 10.30686/1609-9192-2020-1-120-126.

8. Тимофеев И. П., Большунов А. В., Столярова М. С., Авдеев А. М. Тягового устройства на криволинейных участках рельсового пути // Горный информационно-аналитический бюллетень. — 2019. — № 1. — С. 171–178. — DOI: 10.25018/0236-1493-2019-01-0-171-178.

9. Munzenberger P., Wheeler C. Laboratory measurement of the indentation rolling resistance of conveyor belts // Measurement: Journal of the International Measurement Confederation. 2016, vol. 94, pp. 909–918. DOI: 10.1016/j.measurement.2016.08.030.

10. Потрясаев Ю. А., Пьяных А. А., Брезшнев И. В. Организация транспортировки горной массы железнодорожным транспортом // Горный журнал. — 2017. — Т. 5. — С. 36–37. DOI: 10.17580/gzh.2017.05.07.

11. Rahman A. A dynamic analysis of the rail conveyor system // Handling and Transportation. 2019, vol. 35, no. 4, pp. 291–301.

12. Махараткин П. Н., Абдулаев Э. К., Вишняков Г. Ю., Ботян Е. Ю., Пушкарев А. Е. Повышение эффективности функционирования карьерных автосамосвалов на основе обоснования их рациональной скорости с помощью имитационного моделирования // Горный информационно-аналитический бюллетень. — 2022. — № 6-2. — С. 237–250. DOI: 10.25018/0236_1493_2022_62_0_237.

13. Михайлов А. В., Казаков Ю. А., Гарифуллин Д. Р., Короткова О. Ю., Агагена А. Анализ структуры мобильного комплекса для добычи органогенного сырья карьерным способом // Горный информационно-аналитический бюллетень. — 2022. — № 6-1. — С. 317–330. — DOI: 10.25018/0236_1493_2022_61_0_317.

21. Сарапулов Ф. Н., Смолянов И. А., Родионов И. Е. Исследование тягового линейного асинхронного двигателя для конвейерного поезда / Материалы 17-й Международной Уральской конференции по электроприводам переменного тока ACED-2018. — 2018. — Т. 18. — С. 1–4. DOI: 10.1109/ACED.2018.8341685.

27. Серый А. М., Пожеванный А. В. Управление линейно-индукционными двигателями для ленточно-конвейерных поездов // Горный информационно-аналитический бюллетень. — 2007. — № 1. — С. 148–149.

Литературу с п. 14 по п. 20, с п. 22 по п. 26 и с п. 28 по п. 33 смотри в REFERENCES.

34. Курганов В. М., Грязнов М. В., Колобанов С. В. Оценка надежности функционирования экскаваторно-автомобильных комплексов в карьере // Записки Горного института. — 2020. — Т. 241. — С. 10. DOI:10.31897/pmi.2020.1.10.

35. Сафиуллин Р. Н., Афанасьев А. С., Резниченко В. В. Концепция развития систем мониторинга и управления интеллектуальных технических комплексов // Записки Горного института. — 2019. — Т. 237. — С. 322. DOI: 10.31897/PMI.2019.3.322.

36. Al-Assi M., Kassem E. Evaluation of adhesion and hysteresis friction of rubber-pavement system // Applied Sciences. 2017, vol. 10, no. 7. DOI: 10.3390/app7101029.

37. Зайцев Р. М., Чемерис И. Ф. Патент СССР № 967898. Привод конвейерного поезда. 1982.

38. Кондратенко А. С. Технологические аспекты проходки обсаженных скважин с циклично-поточным транспортированием зерна // Записки Горного института. — 2020. — Т. 246. — С. 610–616. DOI: 10.31897/pmi.2020.6.2.

43. Тартаковский Б. Н. Конвейерные поезда в горной промышленности. — Киев: Наукова думка, 1974. — 200 с.

44. Попов Р. О., Малиновский Ю. А., Данилина Г. В. Применение конвейерных поездов для транспортирования железорудного сырья из глубоких шахт и карьеров // Научные труды sworld. — 2015. — Т. 3. — № 1(38). — С. 88–96.

Литературу с п. 39 по п. 42 и с п. 45 по п. 48 смотри в REFERENCES. **ПИАБ**

REFERENCES

1. Gromov E. V. Analysis of contemporary state and development prospects for trunk mine transport in deep mining. *Mezhdunarodnaya mezhdistsiplinarnaya nauchnaya geokonferentsiya po geodezicheskoy s"emke i upravleniyu ekologiyey gornykh rabot, SGEM* [International Multidisciplinary Scientific GeoConference Surveying Geology and Mining Ecology Management, SGEM], 2018, vol. 18, no. 1.3, pp. 63–70. [In Russ]. DOI: 10.5593/SGEM2018/1.3/S03.009.

2. Gromov E. V. Substantiation of the possibility of reconstruction of the underground transport scheme of the mine during the transition to promising methods of ore transportation (on the example of the mountains. +170 m of the Kukisvumchorr deposit). *Problems of Subsoil Use*. 2017, vol. 12, no. 1, pp. 37–47. [In Russ]. DOI: 10.18454/2313-1586.2017.01.038.

3. Yakovlev V. L., Beresnev V. A., Glebov A. V., Marinin M. A. Selecting cyclical-and-continuous process flow diagrams for deep open pit mines. *Zhurnal gornoy nauki*. 2019, vol. 55, no. 5, pp. 783 – 788. [In Russ]. DOI: 10.1134/S106273911905615X.
4. Wheeler C. A. Development of the rail conveyor technology. *International Journal of Mining, Reclamation and Environment*. 2019, vol. 33, no. 2, pp. 118 – 132. DOI: 10.1080/17480930.2017.1352058.
5. Stenin D. On possible changes in the calculation of parameters of transport technology of open pit mining with the use of autonomous heavy platforms. *E3S Web of Conferences*. 2021, vol. 315, no. 9, article 03015. DOI: 10.1051/e3sconf/202131503015.
6. Zhang S., Xia X. Modeling and energy efficiency optimization of belt conveyors. *Applied Energy*. 2011, vol. 88, no. 9, pp. 3061 – 3071. DOI: 10.1016/j.apenergy.2011.03.015.
7. Ismagilov R. I., Kozub A. V., Badtiev B. P., Pavlovich B. P. Experience of using (testing) ground penetrating radar on construction site for steeply inclined conveyor complex in southern pit of mikhailovsky GOK. *Russian Mining Industry Journal*. 2020, no. 1, pp. 120 – 126. [In Russ]. DOI: 10.30686/1609-9192-2020-1-120-126.
8. Timofeev I. P., Bolshunov A. V., Stolyarova M. S., Avdeev A. M. Features of pulling equipment operation in curved railroad sections. *MIAB. Mining Inf. Anal. Bull.* 2019, no. 1, pp. 171 – 178. [In Russ]. DOI: 10.25018/0236-1493-2019-01-0-171-178.
9. Munzenberger P., Wheeler C. Laboratory measurement of the indentation rolling resistance of conveyor belts. *Measurement: Journal of the International Measurement Confederation*. 2016, vol. 94, pp. 909 – 918. DOI: 10.1016/j.measurement.2016.08.030.
10. Potryasaev Y. A., Pianykh A. A., Brezshnev I. V. Organizing of the Rock transportation by Railway Transport. *Gornyi Zhurnal*. 2017, vol. 5, pp. 36 – 37. [In Russ]. DOI: 10.17580/gzh.2017.05.07.
11. Rahman A. A dynamic analysis of the rail conveyor system. *Handling and Transportation*. 2019, vol. 35, no. 4, pp. 291 – 301.
12. Makharatkin P. N., Abdulaev E. K., Vishnyakov G. Yu., Botyan E. Yu., Pushkarev A. E. Improving the efficiency of the functioning of quarry dump trucks based on the justification of their rational speed using simulation modeling. *MIAB. Mining Inf. Anal. Bull.* 2022, no. 6-2, pp. 237 – 250. [In Russ]. DOI: 10.25018/0236_1493_2022_62_0_237.
13. Mikhailov A. V., Kazakov Yu. A., Garufullin D. R., Korotkova O. Yu., Agaguena A. Analysis of the mobile complex structure for organogenic materials mining by in-pit method. *MIAB. Mining Inf. Anal. Bull.* 2022, no. 6-1, pp. 317 – 330. [In Russ]. DOI: 10.25018/0236_1493_2022_61_0_317.
14. Popov S. O., Malinowskii Y. A., Danilina G. V., Kozyrev S. N. The application features of conveyor trains at mining on deep horizons. *Metallurgical and Mining Industry*. 2015, vol. 7, no. 9, pp. 1163 – 1167.
15. Han J., Ruiqian W., Wang D. Effect of wheel load on wheel vibration and sound radiation. *Chinese Journal of Mechanical Engineering*. 2015, vol. 28, no. 1, pp. 46 – 54. DOI: 10.3901/CJME.2014.1110.165.
16. Hao N., Zhang J., Zhang M., Zhang Y. Experimental research on vibration and noise of rail conveyor. *Energy Reports*. 2021, vol. 7, pp. 494 – 504. DOI: 10.1016/j.egyr.2021.10.013.
17. Mosleh A., Meixedo A. Early wheel flat detection: an automatic data-driven wavelet-based approach for railways. *Vehicle System Dynamics*. 2022, no. 1, pp. 115 – 139. DOI: 10.1080/00423114.2022.2103436.
18. Deladi E. L., de Rooij M. B., Schipper D. J. Modelling of static friction in rubber-metal contact. *Tribology International*. 2007, vol. 4, no. 40, pp. 588 – 594. DOI: 10.1016/j.triboint.2005.11.007.
19. Ma B. Estimation of road adhesion coefficient based on tire aligning torque distribution. *Journal of Dynamic Systems, Measurement and Control, Transactions of the ASME*. 2018, no. 5, pp. 140. DOI: 10.1115/1.4038095.
20. Shiri A., Shoulaie A. Design optimization and analysis of single-sided linear induction motor, considering all phenomena. *IEEE Transactions on Energy Conversion*. 2012, vol. 27, no. 2, pp. 516 – 525. DOI: 10.1109/TEC.2012.2190416.

21. Sarapulov F. N., Smolyanov I. A., Rodionov I. E. Investigation of traction linear induction motor for conveyor train. *Materialy 17-y Mezhdunarodnoy Ural'skoy konferentsii po elektropriivodam peremennogo toka ACED-2018* [Materials of the 17th International Ural Conference on AC Electric Drives ACED-2018]. 2018, vol. 18, pp. 1–4. [In Russ]. DOI: 10.1109/ACED.2018.8341685.
22. Kargin V. A., Volgin A. V., Moiseev A. P., Maradudin A. M., Leontiev A. A., Peretyatko A. V. Linear stepping electromagnetic engine for driving conveyors. *Journal of Physics Conference Series*. 2019, vol. 1333, no. 5, article 052011. DOI: 10.1088/1742-6596/1333/5/052011.
23. Piotrowski J., Kik W. A simplified model of wheel rail contact mechanics for non-Hertzian problems and its application in rail vehicle dynamic simulations. *Vehicle System Dynamics*. 2008, vol. 1, no. 46, pp. 27–48. DOI: 10.1080/00423110701586444.
24. Bureika G., Lingaitis L. P., Mikaliūnas Š. Investigation of dynamic models of independently rotating wheels of wagons. *Transport*. 2004, vol. 1, no. 19, pp. 28–31. DOI: 10.1080/16484142.2004.9637949.
25. Mikhailov E., Semenov S., Shvornikova H., Gerlici J., Kovtanets M., Dižo J., Blatnický M., Harušinec J. A study of improving running safety of a railway wagon with an independently rotating wheel's flange. *Symmetry*. 2021, vol. 13, no. 10, article 1955. DOI: 10.3390/sym13101955.
26. Shrestha S. Investigation on how rail surface self-cleaning changes the locomotive traction dynamics. *Lecture Notes in Mechanical Engineering*. 2022, pp. 332–341. DOI: 10.1007/978-3-031-07305-2_34.
27. Seryy A. M., Pozhevanny A. V. Control of linear induction motors for belt-conveyor trains. *MIAB. Mining Inf. Anal. Bull.* 2007, no. 1, pp. 148–149. [In Russ].
28. Budiwantoro B., Agus Kariem M., Basia R. R., Prima G. Stability analysis of rail-conveyor for coals transportation. *Applied Mechanics and Materials*. 2015, vol. 758, pp. 89–93. DOI: 10.4028/www.scientific.net/AMM.758.89.
29. Tomioka T. Research topics on railway vehicle dynamics. *EPI International Journal of Engineering*. 2018, vol. 1, no. 2, pp. 1-12. DOI: 10.25042/epi-ije.082018.01.
30. Ralston J., Reid D., Hargrave C., Hainsworth D. Sensing for advancing mining automation capability. A review of underground automation technology development. *International Journal of Mining Science and Technology*. 2014, vol. 24, no. 3, pp. 305–310. DOI: 10.1016/j.ijmst.2014.03.003.
31. Bobojanov M. K. Study of the efficiency of conveyors of mining transport systems of mining complexes. *E3S Web of Conferences*. 2020, vol. 177, no. 5, article 03023. DOI: 10.1051/e3sconf/202017703023.
32. Dovhaniuk S., Shaposhnyk V. Yu., Shatunov O. V., Shatunov A., Visloguzov V. The results of brake tests of the DPKr-3 diesel train. *IOP Conference Series. Materials Science and Engineering*. 2020, vol. 985, no. 1, article 012020. DOI: 10.1088/1757-899X/985/1/012020.
33. Sun W., Zhang J., Liu Z. Two-time-scale redesign for antilock braking systems of ground vehicles. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*. 2019, vol. 6, no. 66, pp. 4577–4586. DOI: 10.1109/TIE.2018.2864719.
34. Kurganov, V. M., Gryaznov, M. V., Kolobanov, S. V. Assessment of operational reliability of quarry excavator-dump truck complexes. *Journal of Mining Institute*. 2020, vol. 241, pp. 10. [In Russ]. DOI: 10.31897/pmi.2020.1.10.
35. Safullin R. N., Afanasyev A. S., Reznichenko V. V. The concept of development of monitoring systems and management of intelligent technical complexes. *Journal of Mining Institute*. 2019, vol. 237, pp. 322. [In Russ]. DOI: 10.31897/PMI.2019.3.322.
36. Al-Assi M., Kassem E. Evaluation of adhesion and hysteresis friction of rubber-pavement system. *Applied Sciences*. 2017, vol. 10, no. 7. DOI: 10.3390/app7101029.
37. Zaytsev P. M., Chemeris I. F. *Patent SU 967898*. 1982.
38. Kondratenko, A. S. Technological aspects of cased wells construction with cyclical-flow transportation of rock. *Journal of Mining Institute*. 2020, vol. 246, pp. 610–616. [In Russ]. DOI: 10.31897/pmi.2020.6.2.

39. Muller S., Blundell M. The testing of pneumatic tyres for the interpretation of tyre behaviour for road rail vehicles when operating on rails. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers. Part D Journal of Automobile Engineering*. 2023, vol. 2, pp. 639 – 645. DOI: 10.1177/09544070221148289.

40. Wheatley G., Rubel R. I. Analysis of conveyor drive power requirements in the mining industry. *Acta Logistica*. 2021, vol. 8, no. 1, pp. 37 – 43. DOI: 10.22306/al.v8i1.200.

41. Wheeler C. A. Rotating resistance of belt conveyor idler rolls. *Journal of Manufacturing Science and Engineering, Transactions of the ASME*. 2016, vol. 138, no. 4, pp. 19. DOI: 10.1115/1.4031552.

42. Robinson P. W., Orozovic O., Meylan M. H., Wheeler C. A., Ausling D. Optimization of the cross section of a novel rail running conveyor system. *Engineering Optimization*. 2021. DOI: 10.1080/0305215X.2021.1956486.

43. Tartakovskiy B. N. *Konveyernye poezda v gornoy promyshlennosti* [Conveyor trains in the mining industry], Kiev, Naukova dumka, 1974, 200 p.

44. Popov P. O., Malinovsky Yu. A., Danilina G. V. The use of conveyor trains for transporting iron ore raw materials from deep mines and quarries. *Nauchnye trudy Sworld*. 2015, vol. 3, no. 1(38), pp. 88 – 96. [In Russ].

45. Chen X., Jiang H., Chen L., Du W., Gong S. Experimental study on creep characteristics of unloaded rock masses for excavation of rock slopes in cold areas. *Applied Sciences*. 2023, vol. 13, no. 5, pp. 1 – 13. DOI: 10.3390/app13053138.

46. Koptev V. Yu., Kopteva A. V., Ivanova T. S. Directions for the development of transport machines for open-pit mining. *Journal of Applied Engineering Science*. 2021, vol. 19, no. 1, pp. 137 – 141. DOI: 10.5937/jaes0-28708.

47. Carr M. J., Wheeler C. A., Robinson P. W., Chen B. Reducing the energy intensity of overland conveying using a novel rail-running conveyor system. *International Journal of Mining, Reclamation and Environment*. 2020, vol. 35, no. 3, pp. 1 – 16. DOI: 10.1080/17480930.2020.1788199.

48. Jiang Y., Peng P., Wang L., Wang J., Wu J., Liu Y. Lidar-Based local path planning method for reactive navigation in underground mines. *Remote Sensing*. 2023, vol. 15, no. 2, article 309. DOI: 10.3390/rs15020309.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Труфанова Инна Сергеевна¹ – канд. техн. наук,
доцент, e-mail: Trufanova_IS@pers.spmi.ru,
ORCID ID: 0000-0003-3182-9746,

Невзорov Данил Николаевич¹ – аспирант,
e-mail: danilnevzorov@bk.ru,

¹ Санкт-Петербургский горный университет.

Для контактов: Труфанова И.С., e-mail: Trufanova_IS@pers.spmi.ru.

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

I.S. Trufanova¹, Cand. Sci. (Eng.), Assistant Professor,
e-mail: Trufanova_IS@pers.spmi.ru,
ORCID ID: 0000-0003-3182-9746,

D.N. Nevzorov¹, Graduate Student,
e-mail: danilnevzorov@bk.ru,

¹ Saint-Petersburg Mining University,
199106, Saint-Petersburg, Russia.

Corresponding author: I.S. Trufanova, e-mail: Trufanova_IS@pers.spmi.ru.

Получена редакцией 02.05.2023; получена после рецензии 03.07.2023; принята к печати 10.08.2023.

Received by the editors 02.05.2023; received after the review 03.07.2023; accepted for printing 10.08.2023.