

## РАЗРАБОТКА ПОЛЕЗНЫХ ИСКОПАЕМЫХ MINING

ISSN 1995-2732 (Print), 2412-9003 (Online)

УДК 622.24

DOI: 10.18503/1995-2732-2022-20-4-5-14



### ПРИМЕНЕНИЕ ЗАДАЧИ О БРАХИСТОХРОНЕ В ИССЛЕДОВАНИИ ТРАЕКТОРИИ СПУСКА СОСУДА НА ОТКРЫТЫХ ГОРНЫХ РАБОТАХ

Великанов В.С.<sup>1,2</sup>, Дёрина Н.В.<sup>3</sup>, Кочержинская Ю.В.<sup>3</sup>, Мамай Н.В.<sup>1</sup>, Логунова Т.В.<sup>3</sup>

<sup>1</sup> Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б.Н. Ельцина, Екатеринбург, Россия

<sup>2</sup> Уральский государственный горный университет, Екатеринбург, Россия

<sup>3</sup> Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова, Магнитогорск, Россия

**Аннотация. Постановка задачи (актуальность работы).** В статье рассматривается проблема зависимости устойчивости и эффективности освоения глубоких карьеров от актуального выбора технологии и техники для осуществления горных работ. С увеличением глубины карьера усложняются условия транспортировки полезных ископаемых, увеличивается расстояние осуществляемых перевозок, наблюдается рост высоты подъема горной массы и снижение производительности технологического оборудования. В статье представлен анализ существующих конструкций подъемников и наклонных конвейеров. Дается логическое обоснование применению классической задачи о брахистохроне с целью упрощенного описания движения грузового сосуда. В работе продемонстрировано одно из перспективных решений вопроса совершенствования карьерного транспорта с применением грузовых сосудов, движущихся по рельсовым направляющим. При этом трасса спуска реализуется как максимально приближенная к брахистохроне – кривой наискорейшего спуска. Авторами статьи представлены аналитические зависимости для определения основных характеристик спуска сосуда на открытых горных работах. Полученные данные позволяют реализовывать математическую модель трассы спуска, так как доказывают оптимальность профиля трассы для движения грузового сосуда. **Цель исследования.** Представить преимущества использования брахистохроны в процессе спуска грузового сосуда для доставки вспомогательных карьерных грузов к местам ведения открытых горных работ. **Используемые методы.** Применение комплексного подхода позволяет решить поставленные задачи. Его использование в рамках настоящего исследования предполагает функционирование методов научного анализа, компилирования данных из ранее опубликованных исследований, аналитических зависимостей и системного анализа. **Практическая значимость.** Данный подход может быть реализован для компенсации негативного эффекта увеличения глубины разработки на экономические показатели горного предприятия при эксплуатации глубоких карьеров. Модернизация и реконструкции горнотранспортных систем карьеров осуществляются за счет внедрения перспективных средств доставки вспомогательных грузов с максимальной адаптацией к существующей внутрикарьерной инфраструктуре.

**Ключевые слова:** брахистохрона, карьер, открытые горные работы, сосуд, конвейер, транспорт, подъемник

© Великанов В.С., Дёрина Н.В., Кочержинская Ю.В., Мамай Н.В., Логунова Т.В., 2022

#### Для цитирования

Применение задачи о брахистохроне в исследовании траектории спуска сосуда на открытых горных работах / Великанов В.С., Дёрина Н.В., Кочержинская Ю.В., Мамай Н.В., Логунова Т.В. // Вестник Магнитогорского государственного технического университета им. Г.И. Носова. 2022. Т. 20. №4. С. 5-14. <https://doi.org/10.18503/1995-2732-2022-20-4-5-14>



Контент доступен под лицензией Creative Commons Attribution 4.0 License.  
The content is available under Creative Commons Attribution 4.0 License.

# THE BRACHISTOCHRONE PROBLEM APPLIED IN THE STUDY ON A CONVEYANCE DESCENDING TRAJECTORY IN OPEN PIT MINING

Velikanov V.S.<sup>1,2</sup>, Dyorina N.V.<sup>3</sup>, Kocherzhinskaya Yu.V.<sup>3</sup>, Mamay N.V.<sup>1</sup>, Logunova T.V.<sup>3</sup>

<sup>1</sup> Ural Federal University named after the first President of Russia B.N. Yeltsin, Yekaterinburg, Russia

<sup>2</sup> Ural State Mining University, Yekaterinburg, Russia

<sup>3</sup> Nosov Magnitogorsk State Technical University, Magnitogorsk, Russia

**Abstract. Problem Statement (Relevance).** The paper considers the dependence between stability and efficiency of exploitation of deep pits and a relevant selection of mining technology and facilities. When the pit becomes deeper, minerals transportation conditions are characterized as more complicated, entailing a longer conveying distance, greater rock mass hoisting height and lower performance of production equipment. The paper analyzes the existing designs of hoists and inclined conveyors. It contains a logical rationale for applying the classic brachistochrone problem to simplify a description of conveyance movement. The paper shows one of promising solutions to improve open pit transport with conveyances, moving along guidance rails. The descending route is approximated to the brachistochrone, namely a curve of fastest descent. The authors of the paper present the analytical dependence to determine main characteristics of the conveyance descending in open pit mining. The data are used to design a mathematical model of the descending route, as they prove an optimum profile of the route for conveyances. **Objective:** To show advantages of applying the brachistochrone in conveyance descending to deliver auxiliary materials to zones of open pit mining. **Methods Applied.** The applied integrated approach is used to solve the issues. Its application in the research implies functioning of scientific analysis methods, compiling data from the published studies, analytical dependence and a system analysis. **Practical Relevance.** This approach may be used to offset a negative effect of an increased depth of mining on economic performance of the mining plant, when operating deep pits. Mining and conveyor systems of pits are modernized and revamped by introducing promising means of delivery of auxiliary materials adapted to the maximum to the existing infrastructure in the pit.

**Keywords:** brachistochrone, pit, open pit mining, conveyance, conveyor, transport, hoist

## For citation

Velikanov V.S., Dyorina N.V., Kocherzhinskaya Yu.V., Mamay N.V., Logunova T.V. The Brachistochrone Problem Applied in the Study on a Conveyance Descending Trajectory in Open Pit Mining. *Vestnik Magnitogorskogo Gosudarstvennogo Tekhnicheskogo Universiteta im. G.I. Nosova* [Vestnik of Nosov Magnitogorsk State Technical University]. 2022, vol. 20, no. 4, pp. 5-14. <https://doi.org/10.18503/1995-2732-2022-20-4-5-14>

## Введение

Отличительной особенностью развития мировой горнодобывающей промышленности на обозримую перспективу является устойчивый тренд на открытый способ разработки, обеспечивающий наилучшие экономические показатели. Удельный вес открытых горных работ в общем объеме добычи полезных ископаемых, по оценкам экспертов, составляет: в мире – 72-73%, в США – 83%, в Российской Федерации (РФ) и странах СНГ – порядка 70%. Современная технология добычи полезных ископаемых и основные функции по перемещению грузов реализуются с использованием современных видов

транспорта [1]. Необходимо заметить, что общая глубина многих крупных карьеров превышает 200 м, в то время как проектная глубина разработок часто достигает и 700-1000 м [2]. Карьеры перекрывают 90% объем добычи минерального сырья открытым способом.

Как правило, глубина карьеров выступает определяющим фактором, усложняющим условия транспортирования добываемых ископаемых с нижних горизонтов, что подразумевает увеличение дальности перевозок и изменение высоты подъема горной массы, рост средневзвешенных уклонов и ограничение пропускной способности транспортных коммуникаций внутри карьера. Тенденция к сокращению производительности

оборудования на уровне каждых 100 м составляет: в экскаваторно-автомобильных комплексах – экскаваторов 10-15%, автосамосвалов 25-39%; в экскаваторно-железнодорожных комплексах – экскаваторов 17-19%, локомотивосоставов 8,5-20%. Соответственно, размер высоты рабочей зоны увеличивается до 250-300 м, а ширина рабочих площадок уменьшается, в то же время снижается уровень обеспеченности запасами, готовыми к выемке, до 0,4-1,0 месяца, а что касается угла погашения бортов карьера, то происходит его увеличение [3-5].

Таким образом, решение транспортной проблемы выступает основным условием эффективности и продуктивности глубоких карьеров. Однако, как справедливо утверждают специалисты, в условиях открытых горных работ (ОГР) трудоемкость процесса транспортировки остается достаточно высокой, к тому же доля транспорта составляет порядка 60-75% в себестоимости добычи, для глубоких карьеров эта доля достигает 80%.

Для описания карьерного транспорта в научно-технической литературе по открытым разработкам рассматривается автомобильный, железнодорожный и конвейерный транспорт, а также для транспортировки полезных ископаемых в карьерах используются специальные транспортные средства.

Основными карьерными грузами считаются вскрышные породы и полезное минеральное сырье. Соответственно, подъем их на поверхность осуществляется с помощью транспортных средств, представленных выше. К категории вспомогательных грузов относятся взрывчатка, путевые материалы (балласт и шпалы), детали горных машин, смазочные средства и др. Как правило, процесс доставки данных грузов изначально предполагает спуск к месту осуществления горных работ.

Существуют разнообразные системы и средства технологического транспорта, которые справляются с резким увеличением длины транспортной траектории на спуск и подъем, но при этом оказывают негативное воздействие на окружающую среду. Применение самоходного транспорта отличается рядом преимуществ, а именно высокой маневренностью и скоростью передвижения, но предполагает при этом один существенный недостаток – значительное загрязнение окружающей среды. Отработанные газы, выделяемые в процессе транспортировки в атмосферу карьера, содержат вредные приме-

си, включающие следующие вредные компоненты: окись углерода, окислы азота. Несмотря на то, что дизельный двигатель выделяет большое количество сажи, в чистом виде в ней не наблюдается никаких вредных веществ. Помимо высокой поглощающей способности, частицы сажи содержат молекулы и частицы токсичных веществ, включая канцерогены [6]. К решению данной проблемы необходимо подходить комплексно, так как в этом случае дополнительно приходится говорить о вентиляции глубоких карьеров. Современные требования к охране окружающей среды и освоению недр определяют необходимость использования новых подходов и видов транспортного оборудования, минимизирующих риски вредного воздействия на окружающую среду при его эксплуатации на горных предприятиях [6].

В научно-технической литературе достаточно подробно описаны результаты исследований, рассматривающих использование крутонаклонных конвейеров и подъемников в тяжелых горнотехнических условиях при разработке глубоководных месторождений полезных ископаемых открытым способом [7-25].

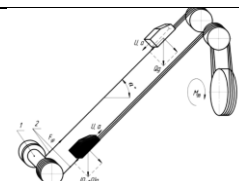
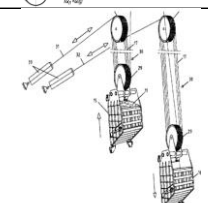
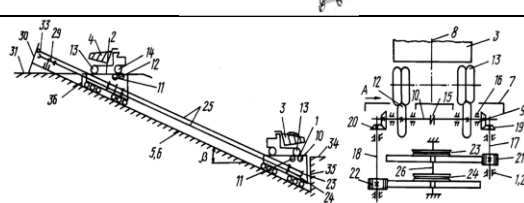
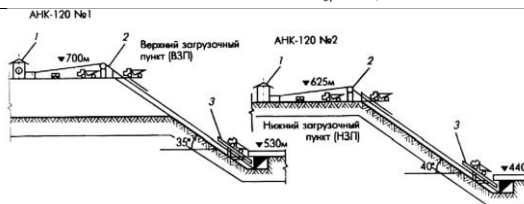

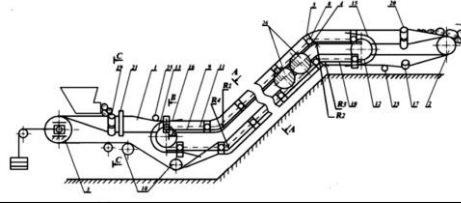
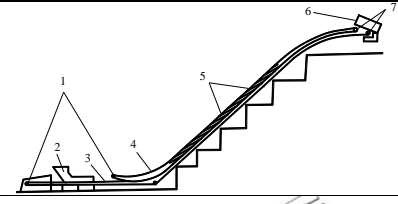
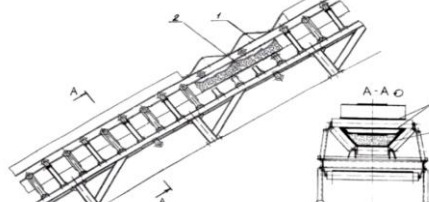
Анализ конструктивного исполнения энергоэффективных крутонаклонных конвейеров и подъемников позволяет установить большое разнообразие их конструкций для различных условий эксплуатации (табл. 1).

### Методология

Безусловно, вопрос о линии наискорейшего спуска под действием силы тяжести имеет давнее происхождение. Рассматривая историографию вопроса о кривой наискорейшего спуска, обнаруживается его давнее происхождение. Галилео Галилей, впервые увидевший эту кривую, «так часто вычерчивающуюся перед глазами каждого», предложил термин «циклоида» (от греческого «циклос» – круглый), то есть происходящая от круга (рис. 1) [26].

Задача о брахистохроне (от греч. βράχιστος – кратчайший + χρόνος – время), то есть прямой наискорейшего спуска, впервые была поставлена Иоганном Бернулли в его статье, опубликованной в первом научном журнале Германии «Acta Eruditorum» в 1696 году. Новая кривая подверглась глубокому анализу, которым занимались Декарт, братья Бернулли, Лейбниц, Ньютон, Ферма и другие мыслители XVII-XVIII веков (рис. 2) [26-30].

Таблица 1. Конструктивные исполнения крутонаклонных конвейеров и подъемников  
Table 1. Design of tilt conveyors and hoists

Авторские конструкции и конструкции на различных предприятиях мира	Общий вид наклонных карьерных подъемных машин и установок
Многоканатная карьерная подъемная установка с дополнительной приводной станцией	
Крутонаклонная подъемная установка для открытой горной выработки	
Подъемная установка с автономным приводом	
Автомобильно-клетевой подъемник АНК-120	
Крутонаклонный конвейер КНК-270	
Крутонаклонный ленточно-колесный конвейер для крупнокусовых грузов	
Крутонаклонный конвейер с прижимной лентой	
Линейный став крутонаклонного конвейера (конструкции ИГД УрО РАН)	

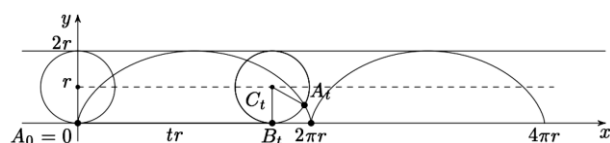


Рис. 1. Циклоида  
Fig. 1. Cycloid

Авторы данного исследования не претендуют на приведение всех возможных решений, которые были получены выдающимися учеными. Самые оригинальные из них достаточно широко и подробно представлены и описаны в научных источниках. Целью данной работы является представление возможностей брахистохроны в решении прикладной задачи, которая заключается в спуске дополнительных грузов к месту ведения открытых горных работ.

Очевиден также и тот факт, что возможности брахистохроны могут использоваться в промышленном производстве с целью сокращения времени по доставке грузов и материалов, а необходимая форма направляющих фокусируется на ускорении доставки, тем самым повышении эффективности производства, производительности и безопасности труда. Примером могут служить элеваторы для подачи зерна, случаи использования спасательных средств для спасения людей, создания трапов в самолетах, при строительстве спортивных сооружений с наибольшим разгоном, а именно горнолыжных и бобслейных трасс с максимальным ускорением.

### Полученные результаты и их обсуждение

Необходимо отметить, что импульсом исследования и практического применения уникального свойства брахистохроны послужила публикация Б.М. Новожилова «Исследование траектории спуска в агрегатах экстренной эвакуации космонавтов на стартовых комплексах» [31]. Проанализировав свойства и характеристики брахистохроны, автор получил расчетные зависимости и представил рекомендации, по которым может осуществляться проектирование средств экстренной эвакуации рельсового типа на основе брахистохроны. Обосновано использование агрегатов рельсового типа с вагонеткой, движущейся в рельсовой конструкции, обеспечивающей необходимую жесткость направляющей системы и возможность установки тормозных устройств в конце траектории движения. Автор отмечает от-

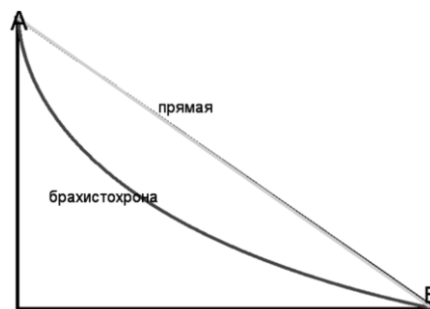


Рис. 2. Брахистохрона  
Fig. 2. Brachistochrone

сутствие научных исследований по реализации данной конструктивной схемы агрегатов на базе рельсовой направляющей системы.

Для достижения поставленной задачи на начальном этапе предлагается следующее техническое решение. В качестве грузового сосуда может быть принята вагонетка грузовая шахтная узкой колеи с глухим кузовом (ГОСТ Р 55727-2013). На рис. 3 представлена возможная трасса направляющей системы спуска сосуда по нерабочему борту карьера, в табл. 2 представлены аналитические зависимости для установления основных характеристик спуска сосуда.

В табл. 3 представлены полученные расчетные значения основных характеристик для различных глубин карьеров.

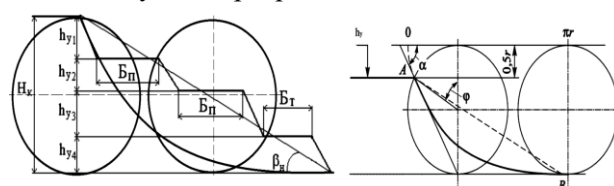


Рис. 3. Трасса направляющей системы спуска сосуда на нерабочем борту карьера  
Fig. 3. Conveyance descending guide system route on a non-mining flank of the pit

Таблица 2. Аналитические зависимости для установления основных характеристик спуска сосуда на открытых горных работах  
Table 2. Analytical dependencies for establishing the main characteristics of the conveyance descent in the open pit mining

Характеристика	Зависимость
Длина брахистохроны в пределах одной арки циклоиды	$S = \left  -4r \cos \frac{\varphi}{2} \right _{\varphi_1}^{\varphi_2}$
Время спуска по брахистохроне	$T = \left  \sqrt{\frac{r}{g}} \varphi \right _{\varphi_1}^{\varphi_2}$
Текущее значение скорости спуска	$v_{\text{брах}} = 2 \sin \frac{\varphi}{2} \sqrt{gr}$
Ускорение, вызывающее движение тела в гравитационном спуске по брахистохроне	$a_{\text{брах}} = g \cos \frac{\varphi}{2}$

Таблица 3. Основные характеристики для различных глубин карьеров (брахистохроны с углом наклона  $\alpha_{нач} = 45^\circ$ )

Table 3. Main characteristics for different pit depths (brachistochrone curves with slope angle  $\alpha_{start} = 45^\circ$ )

Глубина карьера, м	Радиус круга, м	Длина трассы по брахистохроне, м	Ориентировочная длина автомобильной трассы, м (по формуле Ржевского В.В.)	Время спуска по брахистохроне, с
200	100	282,84	3250	7,46
300	150	424,26	4913	8,99
400	200	565,68	6550	10,39

В качестве примера рассмотрим следующий вариант: в настоящее время на карьере осуществляется доработка месторождения руд ( $f - 14 = 16$ ) открытым способом и производится строительство подземного рудника для выемки законтурных запасов. В переходный период изменена система вскрытия путем создания съезда на левом борту карьера, который обеспечивает транспортный доступ ко дну карьера и подземному наклонному съезду. Данное решение приведет к отказу использования автодороги правого борта карьера, соответственно, не предусматривается движение транспортных средств и размещения оборудования. На данном борту разместится карьерный подъемник с дополнительным оборудованием, обеспечивающим спуск карьерных грузов по трассе, максимально приближенной к брахистохроне (рис. 4).

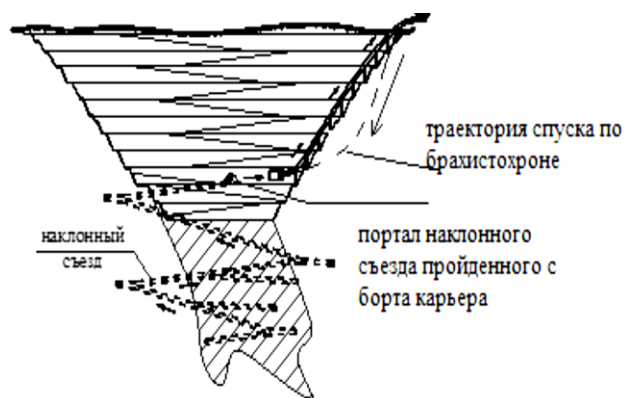


Рис. 4. Вариант размещения комплекса оборудования, обеспечивающего спуск карьерных грузов по трассе, максимально приближенной к брахистохроне

Fig. 4. An option of a layout of equipment ensuring the conveyance descent along the route approximated to the maximum to the brachistochrone

Годовой экономический эффект от внедрения комплекса Э, руб., возможно определить по следующей формуле:

$$\Xi = [C1 + E \cdot K1] - [C2 + E \cdot (K2 + K_y)],$$

где  $C1, C2$  – годовые эксплуатационные расходы до внедрения новой техники и после внедрения, руб.;  $K1, K2$  – стоимость производственных фондов действующего предприятия до внедрения новой техники и после, руб.;  $K_y$  – неамортизируемая часть стоимости ликвидируемых производственных фондов, руб.;  $E$  – нормативный коэффициент эффективности капиталовложений ( $E = 0,12$ ).

Эффект от внедрения комплекса горнотранспортного оборудования, обеспечивающего спуск карьерных грузов по трассе, максимально приближенной к брахистохроне, ориентировочно составит 16,56 млн руб. в год.

#### Направления дальнейших исследований

В перспективе особое внимание необходимо уделить следующим вопросам: замедление и последующее торможение грузового сосуда; определение возможности использования трассы, выполненной по брахистохроне для карьеров глубиной до 200 м; внедрение системы автоматизации по управлению спуском, с возможностью использования безлюдных технологий в погрузке, доставке и выгрузке материалов; проработки вопроса использования монорельса.

#### Заключение

На основании результатов анализа последних научно-исследовательских работ и современного состояния открытых горных работ установлено следующее:

1. На предприятиях горного комплекса приоритетными направлениями для развития транспорта глубоких карьеров является использование инновационных подходов и транспортных средств, которые минимизируют вредное воздействие на окружающую среду в процессе эксплуатации.

2. Предлагаемый в работе вариант решения проблемы доставки дополнительных карьерных грузов позволит повысить эффективность производства, производительность и безопасность труда. В то же время сокращение затрат на транспортировку грузов приведет к экономии энергозатрат.

3. На сегодняшний день вопросы разработки технических требований к проектированию специальных видов транспорта, которые бы соответствовали условиям эксплуатации в конкретных горнотехнических условиях, требуют дополнительных решений.

#### Список источников

1. Галкин В.И., Шешко Е.Е. Проблемы совершенствования транспортных систем в горной промышленности России // Горный информационно-аналитический бюллетень. 2011. №1. С. 485-507.
1. Mulukhov K.K., Beslekoeva Z.N. Retrofitting of steep angle conveyor hoist for coarse cargo in deep open pit mines // Mining Informational and Analytical Bulletin (Scientific and Technical Journal). 2018. No 4. Pp. 179-188.
2. Яковлев В.Л., Тюлькин В.П., Кармаев Г.Д. Технологические аспекты применения крутонаклонных конвейеров в горнорудной промышленности // Горный информационно-аналитический бюллетень. М.: МГГУ-МГИ, 2002. С. 211-217.
3. Кармаев Г.Д., Глебов А.В. Выбор горнотранспортного оборудования циклично-поточной технологии карьеров. Екатеринбург: ИГД УрО РАН, 2012. 296 с.
4. Мулухов К.К., Беслекоева З.Н. Конструкция и расчет крутонаклонного ленточно-колесного конвейера для крупнокусковых грузов и глубоких карьеров // Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал). 2012. № 5. С. 253-258.
5. Шешко О.Е. Эколого-экономическое сравнение применения в глубоких карьерах дизель-троллейбусов и циклично-поточной технологии // Научный вестник Московского государственного горного университета. 2013. № 5. С. 108-116.
6. Эффективность автомобильно-клетевых подъемников АНК-120 на глубоких карьерах / А.Г. Синин, В.И. Белобров, М.А. Файнблит, А.Н. Акишев // Горный журнал. 1995. № 6.
7. Кулешов А.А., Тарасов Ю.Д. Автомобильный карьерный подъемник с автономным приводом // Известия вузов. Горный журнал. 2001. №1. С. 53-56.
8. А.с. 839967 Российская Федерация, МПК В66В15/00. Шахтный многоканатный подъемник / В.И. Вавиловский, И.С. Назаренко, А.А. Сорокин, С.С. Ястребов, М.Н. Карпов, В.В. Вавиловский, Ю.В. Богданов; заявитель и патентообладатель Сибирский металлургический институт. № 2813637, заявл. 03.09.1979, опубл. 23.06.1981, Бюл. № 23.
9. Пат. 2636634 Российская Федерация, МПК В65G 17/12, В65G 37/00, В65G 47/58, В65В 15/08, Е21С 41/26, Е21С 47/00, Е21F 13/04. Крутонаклонная конвейерная установка для открытой горной выработки / Верре Клаус, Вольперс Франц М., Папажевски Детлеф, Раац Виктор; заявитель и патентообладатель ТиссенКрупп Индастриал Солюшенз АГ. № 2014132232, заявл. 30.01.2013, опубл. 24.11.2017, Бюл. № 3.
10. Пат. 2069637 Российская Федерация, МПК В66В 19/06. Устройство для транспортирования грузов / А.Ю. Макеев, А.П. Комиссаров; заявитель и патентообладатель Уральский горный институт им. В.В. Вахрушева. № 93008412, заявл. 09.02.1993, опубл. 20.04.1995.
11. Патент на полезную модель 186195 РФ. Карьерное подъемное устройство / А.А. Гоготин, В.Н. Калмыков, С.Е. Гавришев, К.В. Бурмистров. Опубл. 11.01.2019, Бюл. №2.
12. Обоснование технологических схем транспортирования горной массы с применением карьерных подъемников при разработке месторождений открытоподземным способом / С.Е. Гавришев, К.В. Бурмистров, С.Н. Корнилов, Н.Г. Томилина // Горный журнал. 2016. №5 (2226). С. 41-47.
13. Обоснование целесообразности применения крутонаклонных подъемников в карьере при комбинированном способе разработки месторождения / С.Е. Гавришев, К.В. Бурмистров, В.А. Кидяев, Н.Г. Томилина // Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал). 2012. №6. С. 165-172.
14. Грайнахер Й., Барчет К., Доберт М. Проектирование и монтаж вертикального конвейера на шахте «Уайт каунти» // Глюкауф. 2004. № 2(3). С. 16-23.
15. Галкин В.И., Дмитриев В.Г. Трубочатые конвейеры для горной промышленности // Горное оборудование и электромеханика. 2009. № 1. С. 39-46.
16. Анализ конструкций крутонаклонных конвейеров для карьеров / Е.Д. Николаев и др. // Горный журнал. 1998. № 11-12. С. 62-25.
17. Картавый А.Н. Крутонаклонные ленточные конвейеры для горной промышленности // Горное оборудование и электромеханика. 2006. № 10. С. 22-26.
18. Картавый А.Н. Проблемы применения различных типов крутонаклонных ленточных конвейеров // Тяжелое машиностроение. 2007. № 3. С. 31-34.
19. Шешко Е.Е. Проблемы крутонаклонных ленточных конвейеров с прижимной лентой // Горные машины: сб. науч. тр. Отдельный выпуск ГИАБ № 8. М.: Мир горной книги, 2008. 384 с.
20. Картавый А.Н. Перспективы применения крутонаклонных конвейеров с прижимной лентой при ЦПТ // Горный журнал. № 6. 2003. С. 52-56.
21. Николаев Е.Д., Назаров А.В. Новая технология разработки глубоких карьеров с применением модернизированных крутонаклонных конвейеров // Недропользование XXI век. 2010. № 2. С. 62-64.

22. Котяшев А.А., Каледин А.В. Применение ленточных крутонаклонных конвейеров для транспортирования горной массы // Горный журнал. 1990. № 5. С. 61-63.
23. Великанов В.С., Гуров М.Ю. Развитие научно-методологических основ совершенствования карьерных экскаваторов на базе нечетко-множественного подхода. Магнитогорск: Изд-во Магнитогорск. гос. техн. ун-та им. Г.И. Носова, 2018. 217 с.
24. Галкин В.И., Дмитриев В.Г. Трубчатые конвейеры для горной промышленности // Горное оборудование и электромеханика. 2009. №1.
25. Берман Г.Н. Циклоида. М.: Наука, 1980. 112 с.
26. Иванов А.А., Лукьянов А.А. Еще о брахистохроне и таутохроне // Физическое образование в вузах. 1999. Т. 5. № 3. С. 54-61.
27. Каганов В.И. О двух великих швейцарских математиках Бернулли – Якобе и Иоганне / Сайт электронного журнала. Научно-популярный журнал для юношества «Страна знаний». № 2. 2016.
28. Зароднюк А.В., Черкасов О.Ю. Качественный анализ оптимальных траекторий движения материальной точки в сопротивляющейся среде и задача о брахистохроне // Известия Российской академии наук. Теория и системы управления. 2015. № 1. С. 41-49.
29. Белоцерковская И.Е., Ефимова Э.В., Втюрин М.Ю. Решение задачи о брахистохроне с помощью электронных таблиц в рамках программы дополнительного образования // Информатизация образования: проблемы и перспективы: сб. науч. ст. IV Всерос. науч.-практ. интернет-конференции, посвященной памяти Д.Ш. Матроса / под общей ред. Г.Б. Поднебесовой. Челябинск: Изд-во Южно-Урал. гос. гуман.-пед. ун-та, 2018. С. 8-18.
30. Новожилов Б.М. Исследование траектории спуска в агрегатах экстренной эвакуации космонавтов на стартовых комплексах / Б.М. Новожилов // Инженерный журнал: наука и инновации. 2019. № 10 (94). С. 1-13.
4. Karmaev G.D., Glebov A.V. *Vybor gornotransportnogo oborudovaniya tsiklichno-potochnoy tekhnologii karerov* [The choice of mining and transport equipment for cyclic-and-continuous technology of open pits]. Yekaterinburg: Mining Institute of the Ural Branch, the Russian Academy of Sciences, 2012, 296 p. (In Russ.)
5. Mulukhov K.K., Beslekoeva Z.N. Design and calculation of a steeply inclined wheel-belt conveyor for large-sized cargo and deep pits. *Gornyi informatsionno-analiticheskii byulleten (nauchno-tekhnicheskii zhurnal)* [Mining Information and Analytical Bulletin (Scientific and Technical Journal)], 2012, no. 5, pp. 253-258. (In Russ.)
6. Sheshko O.E. Ecological and economic comparison of the use of diesel trolley cars and cyclic-and-continuous technology in deep pits. *Nauchnyi vestnik Moskovskogo gosudarstvennogo gornogo universiteta* [Scientific Bulletin of Moscow State Mining University], 2013, no. 5, pp. 108-116. (In Russ.)
7. Sisin A.G., Belobrov V.I., Fainblit M.A., Akishev A.N. Efficiency of automobile cage hoists ANK-120 in deep pits. *Gornyi zhurnal* [Mining Journal], 1995, no. 6. (In Russ.)
8. Kuleshov A.A., Tarasov Yu.D. Self-driven open pit automobile hoist. *Izvestiya vuzov. Gornyi zhurnal* [News of Higher Education Institutions. Mining Journal], 2001, no. 1, pp. 53-56. (In Russ.)
9. Vavilovsky V.I., Nazarenko I.S., Sorokin A.A., Yastrebov S.S., Karpov M.N., Vavilovsky V.V., Bogdanov Yu.V. *Shakhtnyi mnogokanatnyi podemnik* [Mine multi-rope hoist]. Author's certificate of the Russian Federation, no. 839967, 1981.
10. Werre Klaus, Wolpers Franz M., Papagewski Detlef, Raaz Viktor. *Krutonaklonnaya konveiernaya ustanovka dlya otkrytoi gornoi vyrabotki* [Steep conveying installation for open-cast mining]. Patent RU, no. 2636634, 2017.
11. Makeev A.Yu., Komissarov A.P. *Ustroistvo dlya transportirovaniya gruzov* [Device for cargo handling]. Patent RU, no. 2069637, 1995.
12. Gogotin A.A., Kalmykov V.N., Gavrishchev S.E., Burmistrov K.V. *Karernoe podemnoye ustroystvo* [Open pit hoist]. Utility model patent RU, no. 186195, 2019.
13. Gavrishchev S.E., Burmistrov K.V., Kornilov S.N., Tomilina N.G. Rationale for process flow charts of rock mass transportation using pit hoists in open pit and underground mining. *Gornyi zhurnal* [Mining Journal], 2016, no. 5 (2226), pp. 41-47. (In Russ.)
14. Gavrishchev S.E., Burmistrov K.V., Kidyaev V.A., Tomilina N.G. Rationale for using steeply inclined conveyors in a pit, when applying a combined method of deposit development. *Gornyi informatsionno-analiticheskii byulleten (nauchno-tekhnicheskii zhurnal)* [Mining Information and Analytical Bulletin (Scientific and Technical Journal)], 2012, no. 6, pp. 165-172. (In Russ.)
15. Greinacher J., Barchet K., Dobert M. Design and installation of a vertical conveyor at the White County mine. *Glueckauf*, 2004, 2(3), 16-23.

## References

1. Galkin V.I., Sheshko E.E. Problems of improving transport systems in the mining industry in Russia. *Gornyi informatsionno-analiticheskii byulleten* [Mining Information and Analytical Bulletin], 2011, no. 1, pp. 485-507. (In Russ.)
2. Mulukhov K.K., Beslekoeva Z.N. Retrofitting of steep angle conveyor hoist for coarse cargo in deep open pit mines. *Gornyi informatsionno-analiticheskii byulleten (nauchno-tekhnicheskii zhurnal)* [Mining Information and Analytical Bulletin (Scientific and Technical Journal)], 2018, no. 4, pp. 179-188. (In Russ.)
3. Yakovlev V.L., Tyulkin V.P., Karmaev G.D. Technological aspects of the use of steeply inclined conveyors in the mining industry. *Gornyi informatsionno-analiticheskii byulleten* [Mining Information and Analytical Bulletin]. Moscow: Moscow State Mining University-Moscow Mining Institute, 2002, pp. 211-217. (In Russ.)

16. Galkin V.I., Dmitriev V.G. Tubular conveyors for the mining industry. *Gornoe oborudovanie i elektromekhanika* [Mining Equipment and Electromechanics], 2009, no. 1, pp. 39-46. (In Russ.)
17. Nikolaev E.D. et al. Design analysis of steeply inclined conveyors for quarries. *Gornyi zhurnal* [Mining Journal], 1998, no. 11-12, pp. 62-25. (In Russ.)
18. Kartavyi A.N. Steeply inclined belt conveyors for the mining industry. *Gornoe oborudovaniye i elektromekhanika* [Mining Equipment and Electromechanics], 2006, no. 10, pp. 22-26. (In Russ.)
19. Kartavyi A.N. Problems of applying various types of steeply inclined belt conveyors. *Tyazheloe mashinostroyeniye* [Heavy Engineering], 2007, no. 3, pp. 31-34. (In Russ.)
20. Sheshko E.E. *Problemy krutonaklonnykh lentochnykh konveyerov s prizhimnoy lentoy* [Problems of steeply inclined belt conveyors with a pressure belt]. Mining Machines: Collection of papers. Special issue of Mining Information and Analytical Bulletin No. 8. Moscow: Books on mining, 2008, 384 p. (In Russ.)
21. Kartavyi A.N. Prospects for the use of steeply inclined conveyors with a pressure belt in cyclic-and-continuous technology. *Gornyi zhurnal* [Mining Journal], 2003, no. 6, pp. 52-56. (In Russ.)
22. Nikolaev E.D., Nazarov A.V. New technology for the development of deep pits using modernized steeply inclined conveyors. *Nedropolzovanie XXI vek* [Sub-surface use in the 21<sup>st</sup> century], 2010, no. 2, pp. 62-64. (In Russ.)
23. Kotyashev A.A., Kaledin A.V. The use of steeply inclined belt conveyors for transporting rock mass. *Gornyi zhurnal* [Mining Journal], 1990, no. 5, pp. 61-63. (In Russ.)
24. Velikanov V.S. Gurov M.Yu. *Razvitie nauchno-metodologicheskikh osnov sovershenstvovaniya karernykh ekskavatorov na baze nechetko-mnozhestvennogo podkhoda* [Development of the scientific and methodological framework for improving mining excavators based on a fuzzy-multiple criteria approach]. Magnitogorsk: Nosov Magnitogorsk State Technical University, 2018, 217 p. (In Russ.)
25. Galkin V.I., Dmitriev V.G. Tubular conveyors for the mining industry. *Gornoe oborudovanie i elektromekhanika* [Mining Equipment and Electromechanics], 2009, no. 1. (In Russ.)
26. Berman G.N. *Tsikloida* [Cycloid]. Moscow: Science, 1980, 112 p. (In Russ.)
27. Ivanov A.A., Lukyanov A.A. More about brachistochrone and tautochrone. *Fizicheskoe obrazovanie v vuzakh* [Physics at universities], 1999, vol. 5, no. 3, pp. 54-61. (In Russ.)
28. Kaganov V.I. About two great Swiss mathematicians Bernoulli - Jacob and Johann. *Nauchno-populyarnyi zhurnal dlya yunoshestva «Strana znanii»* [Popular science journal for the youth Country of Knowledge], 2016, no. 2.
29. Zarodnyuk A.V., Cherkasov O.Yu. Qualitative analysis of optimal motion trajectories of a material point in resisting medium and the brachistochrone problem. *Izvestiya Rossiiskoi akademii nauk. Teoriya i sistemy upravleniya* [Proceedings of the Russian Academy of Sciences. Theory and Control Systems], 2015, no. 1, pp. 41-49. (In Russ.)
30. Belotserkovskaya I.E., Efimova E.V., Vtyurin M.Yu. Solving the brachistochrone problem using spreadsheets in the framework of the extended education curriculum. *Informatizatsiya obrazovaniya: problemy i perspektivy: sbornik nauchnykh statey IV Vserossiiskoi nauch.-praktich. internet-konferentsii, posvyashchennoi pamyati D.Sh. Matrosa. Pod obshchey red. G.B. Podnebesovoy* [Informatization of education: problems and prospects: collection of research papers of the 4th All-Russian Scientific and Practical Internet Conference dedicated to the memory of D.Sh. Matros. Ed. by G.B. Podnebesova]. Chelyabinsk: Publishing House of South Ural State University of Humanities and Pedagogy, 2018, pp. 8-18. (In Russ.)
31. Novozhilov B.M. Study of the descent trajectory in astronaut emergency evacuation units at launch complexes. *Inzhenernyi zhurnal: nauka i innovatsii* [Engineering Journal: Science and Innovations], 2019, no. 10(94), pp. 1-13. (In Russ.)

Поступила 26.09.2022; принята к публикации 19.10.2022; опубликована 22.12.2022  
Submitted 26/09/2022; revised 19/10/2022; published 22/12/2022

**Великанов Владимир Семенович** – доктор технических наук, профессор,  
Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б.Н. Ельцина,  
Екатеринбург, Россия. Уральский государственный горный университет, Екатеринбург, Россия.  
Email: rzhik\_00@mail.ru. ORCID 0000-0001-5581-2733

**Дёрина Наталья Владимировна** – кандидат филологических наук, доцент,  
Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова, Магнитогорск, Россия.  
Email: nataljapidckaluck@yandex. ORCID 0000-0002-0613-0864

**Кочержинская Юлия Витальевна** – кандидат технических наук, доцент,  
Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова, Магнитогорск, Россия.  
Email: y.kocherzhinskaya@mail.ru. ORCID 0000-0001-5779-2588

**Мамай Никита Валерьевич** – студент, Уральский федеральный университет имени первого  
Президента России Б.Н. Ельцина, Екатеринбург, Россия.

**Логунова Татьяна Валерьевна** – магистрант, Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова, Магнитогорск, Россия.

**Vladimir S. Velikanov** – DrSc (Eng.), Professor,  
Ural Federal University named after the First President of Russia B.N. Yeltsin, Yekaterinburg, Russia.  
Ural State Mining University, Yekaterinburg, Russia.  
Email: rizhik\_00@mail.ru. ORCID 0000-0001-5581-2733

**Natalja V. Dyorina** – PhD (Philology), Associate Professor,  
Nosov Magnitogorsk State Technical University, Magnitogorsk, Russia.  
Email: nataljapidckaluck@yandex. ORCID 0000-0002-0613-0864

**Yuliya V. Kocherzhinskaya** – PhD (Eng.), Associate Professor,  
Nosov Magnitogorsk State Technical University, Magnitogorsk, Russia.  
Email: y.kocherzhinskaya@mail.ru. ORCID 0000-0001-5779-2588

**Nikita V. Mamay** – student,  
Ural Federal University named after the First President of Russia B.N. Yeltsin, Yekaterinburg, Russia.

**Tatiana V. Logunova** – master degree student,  
Nosov Magnitogorsk State Technical University, Magnitogorsk, Russia.