

# ПОВЫШЕНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ ФУНКЦИОНИРОВАНИЯ КАРЬЕРНЫХ АВТОСАМОСВАЛОВ НА ОСНОВЕ ОБОСНОВАНИЯ ИХ РАЦИОНАЛЬНОЙ СКОРОСТИ С ПОМОЩЬЮ ИМИТАЦИОННОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ

П. Н. Махараткин<sup>1</sup>, Э. К. Абдулаев<sup>1</sup>, Г. Ю. Вишняков<sup>1</sup>, Е. Ю. Ботян<sup>1</sup>, А. Е. Пушкарев<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Санкт-Петербургский горный университет, Санкт-Петербург, 199106, Россия

<sup>2</sup> Санкт-Петербургский архитектурно-строительный университет,  
Санкт-Петербург, 190005, Россия

**Аннотация:** Представлено решение задачи по разработке методического аппарата формирования научно обоснованных рекомендаций для выбора скоростного режима движения карьерных автосамосвалов в конкретных горно-геологических и климатических условиях применения, обеспечивающего повышение эффективности эксплуатации рудничного транспорта. Показан способ формирования перечня наиболее значимых факторов и параметров, определяющих и характеризующих функционирование карьерных автосамосвалов, с учетом их уровня значимости, для оценки существующих решений систем для активного мониторинга текущего состояния машин. Обоснован выбор скорости движения автосамосвала в качестве главного фактора, определяющего эффективность эксплуатации автосамосвалов и оказывающего непосредственное воздействие на текущее и прогнозируемое техническое состояние машин. На основании выявленных закономерностей изменения скорости движения от различных факторов, а также при помощи прикладной программы, созданной для достижения целей имитационного моделирования движения различных моделей карьерных автосамосвалов в конкретных условиях эксплуатации, были получены результаты имитационного моделирования, позволившие определить влияние как целых групп, так и конкретных факторов на скорость движения автосамосвала в зависимости от условий эксплуатации и технических характеристик машины на примере карьерного автосамосвала CAT 793D.

**Ключевые слова:** мониторинг состояния, параметр, фактор, карьерный автосамосвал, скорость движения, транспортная система, сопротивление движению, моделирование.

**Благодарности:** работа выполнена в ходе реализации решения Научного совета Санкт-Петербургского горного университета «Научный проект «Научный инкубатор» и приказа от 13.07.2021 № 1395адм в рамках первого этапа научной программы «Научный инкубатор». Исследование выполнено за счет субсидии на выполнение государственного задания в сфере научной деятельности на 2021 год №FSRW-2020–0014.

**Для цитирования:** 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.

---

## Increase of efficiency of dump trucks functioning on the basis of justification of their rational speed by means of simulation modeling

P. N. Makharatkin<sup>1</sup>, E. K. Abdulaev<sup>1</sup>, G. Yu. Vishnyakov<sup>1</sup>, E. Yu. Botyan<sup>1</sup>, A. E. Pushkarev<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Saint Petersburg Mining University, Saint-Petersburg, 199106, Russia;

<sup>2</sup> St-Petersburg University of Architecture and Civil Engineering, Saint-Petersburg, 190005, Russia

---

**Abstract:** The paper presents a solution to the problem of developing a methodological apparatus for the formation of scientifically based recommendations for choosing the speed mode of movement of dump trucks in specific mining-geological and climatic conditions of application, providing an increase in the efficiency of mine transport operation. The method of forming a list of the most significant factors and parameters that determine and characterize the functioning of quarry dump trucks, taking into account their level of significance, is shown to evaluate existing solutions of systems for active monitoring of the current state of machines. The choice of the dump truck speed as the main factor determining the efficiency of dump truck operation and having a direct impact on the current and projected technical condition of the machines is justified. Based on the revealed patterns of changes in the speed of movement from various factors, as well as using an application program created to achieve the goals of simulation modeling of the movement of various models of dump trucks in specific operating conditions, the results of simulation modeling were obtained, which made it possible to determine the influence of both whole groups and specific factors on the speed of the dump truck, depending on the operating conditions and the technical characteristics of the machine on the example of a CAT 793D dump truck.

**Key words:** condition monitoring; parameter; factor; dump truck; movement speed; transport system; movement resistance, modeling.

**Acknowledgements:** The research was performed at the expense of the subsidy for the state assignment in the field of scientific activity for 2021 №FSR W-2020–0014.

The research was carried out at the expense of a grant for the implementation of the state task in the field of scientific activity for 2021 No. FSRW-2020–0014.

**For citation:** Makharatkin P. N., Abdulaev E. K., Vishnyakov G. Yu. , Botyan E. Yu., Pushkarev A. E. Increase of efficiency of dump trucks functioning on the basis of justification of their rational speed by means of simulation modeling. *MIAB. Mining Inf. Anal. Bull.* 2022;(6–2):237–250. [In Russ]. DOI: 10.25018/0236\_1493\_2022\_62\_0\_237.

---

### Введение

Темпы развития горной промышленности постоянно увеличиваются. Это способствует ускоренной модернизации различной техники, без которой эффективная работа попросту невозможна. Особое внимание уделяется автотранспорту, потому что именно на его долю выпадает большая часть перевозок полезного ископаемого в мире. Для того чтобы автосамосвалы показывали наивысший уровень производительности и надежности, их постоянно модернизируют,

внедряя самое лучшее и современное оборудование. Ярким примером такого оборудования являются системы автоматического управления и обслуживания. Самые разные фирмы стараются преуспеть в сфере автоматизированного управления, а в некоторых случаях и вовсе перейти на роботизированные системы [1].

Однако помимо совершенствования техники существует потребность расширения сферы применения технических средств в более сложных условиях с целью решения сложных задач

на крупномасштабных объектах, где горно-геологические и климатические условия непригодны для инфраструктуры, необходимой человеку.

Для эффективного управления, активного мониторинга и своевременного обслуживания машины используют огромное количество систем разного типа и датчиков, которые позволяют получать различную информацию о работе автосамосвала в режиме реального времени. Сбор и анализ информации позволяет строить планы по обслуживанию автомобиля или экстренно проводить ремонт. Помимо этого подобные системы автоматизации процесса предоставляют пользователю возможность вносить корректировки в производственный процесс с целью повышения эффективности, в зависимости от режимов работы оборудования или каких-либо внешних факторов [2]. При этом одним из главных факторов, с одной стороны, определяющих эффективность эксплуатации автосамосвалов и, с другой стороны, оказывающих непосредственное воздействие на техническое состояние машин, является скорость перемещения на маршруте.

### **Цель**

В связи с этим выявление закономерностей, отражающих влияние скорости движения автосамосвалов при выполнении транспортной задачи на эффективность работы транспортной системы горнодобывающего предприятия, на основе установленных рациональных значений, является весьма актуальной научно-технической задачей. При этом разработка метода расчета и обоснование рекомендаций по режимам работы на основе учета меняющихся условий эксплуатации и скоростных режимов движения имеет высокую практическую значимость.

### **Материалы и методы**

Важным этапом при построении эффективной транспортной системы горнодобывающего предприятия является анализ и оценка существующего опыта. Современные системы строятся на базе учета факторов, определяющих особенности функционирования техники в условиях конкретного месторождения. При этом существует ряд решений, которые носят универсальный характер и могут быть применены для большинства условий. В то же время некоторые особенности конкретного месторождения могут носить определяющий характер и требуют повышенного внимания и, как следствие, уточнённого подхода.

Одним из путей повышения эффективности функционирования транспорта горного предприятия является организация системы онлайн-мониторинга рабочих параметров машин с целью недопущения критических значений контролируемых величин и выработки обоснованных рекомендации для принятия организационных и технических решений. Так, например, системы активного мониторинга состояния машин для организации своевременного их обслуживания используют огромное количество датчиков различного типа, которые позволяют получать информацию о работе автосамосвала в режиме реального времени. Собранные информация используется при построении планов по обслуживанию автомобилей или проведении экстренного ремонта. Помимо этого подобные системы предоставляют возможность вносить корректировки в производственный процесс с целью повышения эффективности, в зависимости от режимов работы оборудования или каких-либо внешних факторов. При этом для достижения поставленной цели необходимо учитывать, воз-

можно, больший круг факторов, влияющих на эффективность эксплуатации техники.

Аналитическая оценка технического уровня существующих систем контроля технических параметров позволяет определить, какие факторы важны для предприятий, какую конкретно информацию предприятия получают или хотели бы получать. Можно выделить некоторые группы параметров, контроль которых важен для целенаправленного управления режимами работы машин:

- параметры системы загрузки и топлива (СЗТ);
- параметры энергетической установки — двигателя внутреннего сгорания (ДВС);
- параметры управления тяговыми электроприводами (ТЭП);
- параметры гидравлической системы (ГС);
- параметры трансмиссии и колес.

На этом список групп параметров не исчерпывается. Но важным является то, что в соответствии с этими группами параметров определяется перечень факторов, на них влияющих и, тем самым, структура системы мониторинга.

Для составления наиболее полного списка факторов и параметров, определяющих и характеризующих функционирование карьерных автосамосвалов, определения их значимости и для оценки существующих решений систем активного мониторинга рекомендуется использовать экспертный метод, при котором можно учесть опыт и мнения как разработчиков и производителей машин, так и специалистов, осуществляющих их эксплуатацию и обслуживание.

Так, например (рис. 1), сравнительный анализ уровня значимости параметров ДВС, необходимых

для принятия технических решений (1) при эксплуатации в сопоставлении с предлагаемыми решениями существующих систем (2) показывает, что в ряде случаев мнение специалистов, эксплуатирующих технику, не в полной мере учитывается при организации систем мониторинга. В этом, на наш взгляд, заключается весьма значительный резерв для повышения эффективности эксплуатации.

Реализованный подход позволяет не только оценить технический уровень существующих систем активного мониторинга, но и сконцентрировать внимание на параметрах, управление которыми решающим образом влияет на обеспечение эффективности эксплуатации карьерных автосамосвалов. Так, анализ результатов сравнения уровня значимости параметров (см. рис. 1) показывает, что одним из наиболее значимых является актуальная скорость движения автосамосвала. Справедливость этого вывода подтверждается многими учеными, исследовавшими вопросы повышения эффективности горных транспортных машин, как в России, так и за рубежом: Астафьев Ю. П. [3], Глебов А. В. [4], Беликова Д. Д. [5], Васильев М. В. [6], Ворошилов Г. А. [7], Голубев В. А. [8], Гончаров С. А. [9], Довженок А. С. [10], Журавлев А. Г. [11], Зырянов И. В. [12], Лель Ю. И. [13], Kholmsky A. V. [14], Потапов М. Г. [15], Хохряков В. С. [16], Эткина Н. И. [17], Яковлев В. Л. [18], Derzko N. A. [19], Buki P, [20], Brown R. [21], Chadwick J. R. [22], Boyd G. [23] и др. При этом отмечается, что исследование влияния различных факторов на скорость движения и, как следствие, на эффективность всего транспортного комплекса может определяться теоретическим методом (на основе общетехнических аспектов), эмпирическим путем (проведение натурного экспери-

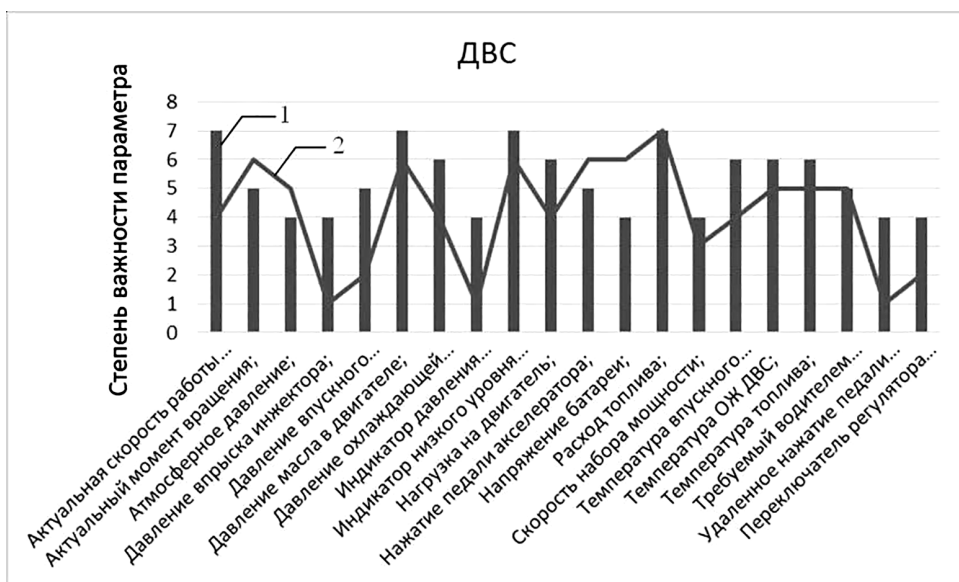


Рис. 1. Сравнение уровня значимости параметров: 1 – необходимые для принятия технических решений; 2 – предлагаемые в существующих системах  
 Fig. 1. Comparison of the level of significance of the parameters: 1 – necessary for making technical decisions; 2 – proposed in the existing systems

мента) или с помощью имитационного моделирования [24–26].

Современный уровень развития вычислительной техники выводит имитационное моделирование на передний план выполнения научных исследований [26–29]. Это особенно актуально для масштабных процессов, с большим числом факторов и параметров, к которым, без сомнения, относится изучение закономерностей работы транспортных систем горнодобывающих предприятий [30–33].

### Результаты

Для целей имитационного моделирования влияния различных факторов на скорость движения автосамосвала была разработана прикладная программа (ПП) для ПК. Программа представляет из себя консольное приложение с вводом и выводом информации. Принципиальная блок-схема ПП представлена на рис. 2.

В качестве исходных данных используются характеристики условий эксплуатации и технические характеристики автосамосвалов.

Принимается, что скорость движения техники  $v$  связана с мощностью двигателя  $N_{дв}$  прямо пропорциональной зависимостью:

$$v \sim N_{дв} \quad (1)$$

Однако при движении по трассе возникают силы, препятствующие движению. Следовательно, их сумма  $W_{сум}$  будет обратно пропорциональна скорости движения. Таким образом:

$$v \approx \frac{N_{дв}}{W_{сум}} \quad (2)$$

С учетом КПД трансмиссии данного автосамосвала получим:

$$v = \frac{N_{дв} \eta_{тр}}{W_{сум}} \quad (3)$$



Рис. 2. Принципиальная блок-схема расчета скорости движения автосамосвала в зависимости от условий эксплуатации  
 Fig. 2. Principle block diagram for calculating the speed of a dump truck depending on operating conditions

Проведем проверку размерностей согласно СИ:

$$[v] = \frac{BT}{H} = \left(\frac{\text{кг} \cdot \text{м}^2}{\text{с}^3}\right) / \left(\frac{\text{кг} \cdot \text{м}}{\text{с}^2}\right) = \text{м/с}. \quad (4)$$

Так как скорость движения действительно измеряется в м/с, следовательно, проверка размерностей пройдена.

Соответственно, итоговая формула примет следующий вид:

$$v = 3,6 \cdot \frac{N_{дв} \eta_{тр}}{W_{сум}}, \text{ км/ч}. \quad (5)$$

Для проверки данной формулы необходимо сопоставить значения, полученные при подстановке в нее чисел, со значениями, полученными согласно графику тягового усилия конкретной модели автосамосвала.

В качестве примера выполним расчет скорости движения по участку со следующими характеристиками: уклон +15 ‰, длина 1000 м, забойная дорога со скальным покрытием, скорость ветра 0 м/с, радиус поворота 0 м.

Исходя из рис. 3, для автосамосвала CAT 793D с электрической трансмиссией ( $\eta_{тр} = 0,8$ ), при полной нагрузке имеем скорость, равную 10 км/ч.

Для данной трассы  $W_{сум}$  самосвала данной модели составит примерно 489 кН.

Подставим значения в формулу:

$$v = 3,6 \cdot \frac{N_{дв} \eta_{тр}}{W_{сум}} = 3,6 \cdot \frac{1801 \cdot 0,8}{489} = 10,6 \text{ км/ч}. \quad (6)$$

Полученные значения отличаются на 0,6 км/ч, или же на 3,8%.

Возьмем для расчетов трассу с теми же параметрами, но с автосамосвалом CAT 777D с электрической трансмиссией.

Согласно графической зависимости (рис. 4), при данных условиях трассы скорость движения составит 8 км/ч.

Для данной трассы  $W_{сум}$  данного самосвала составит примерно 245 кН.

При подстановке значений в формулу получим:

$$v = 3,6 \cdot \frac{N_{дв} \eta_{тр}}{W_{сум}} = 3,6 \cdot \frac{749 \cdot 0,8}{245} = 8,8 \text{ км/ч.} \quad (7)$$

Полученные значения отличаются на 0,8 км/ч, или же на 9,1%.

Таким образом, учитывая, что расчетные значения скорости движения отличаются от значений, рекомендованных графиком тягового усилия конкретной модели автосамосвала не более чем на 10%, появляется возможность

использовать разработанную ПП для имитационного моделирования движения карьерных автосамосвалов в различных условиях эксплуатации.

### Обсуждение результатов

Имитационное моделирование выполнялось для модели автосамосвала CAT 793D (номинальная грузоподъемность – 220 т), при прямолинейном движении (радиус поворота 0 м). Варьировались: уклон, ‰; удельное сопротивление движению, Н/т; нагрузка самосвала, т. Моделирование проводилось в плане полнофакторного

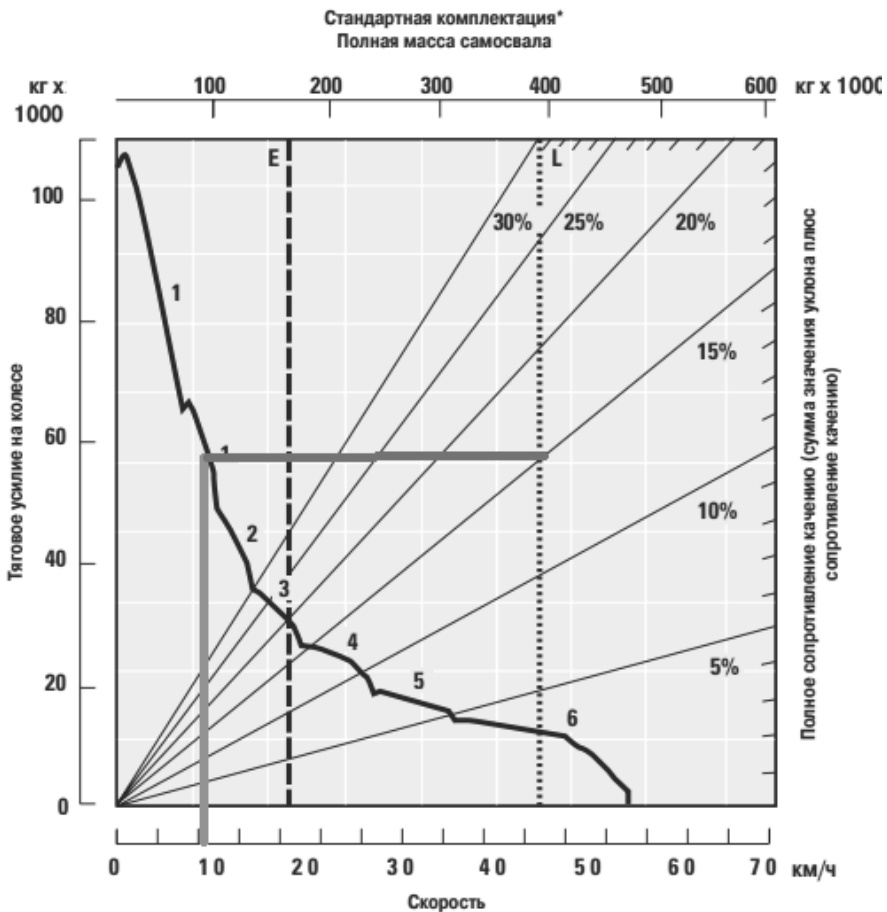


Рис. 3. Тяговая характеристика CAT 793D  
Fig. 3. Traction Characteristics of the CAT 793D

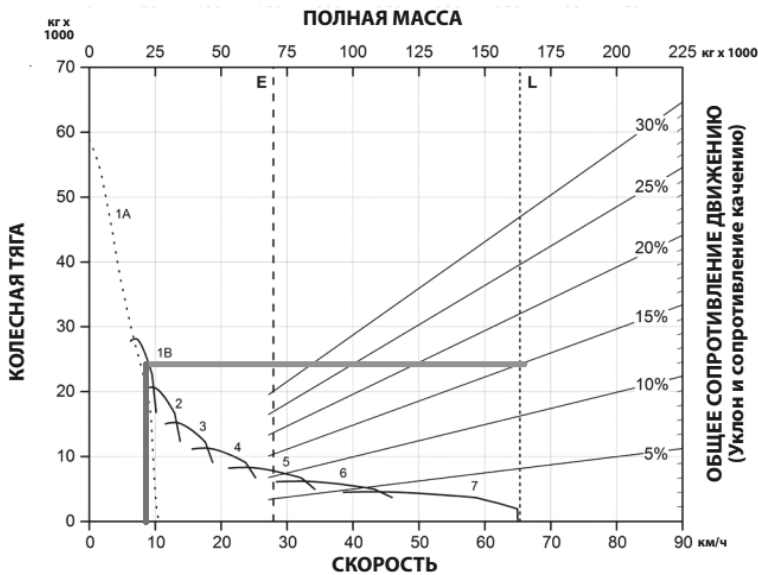


Рис. 4. Тяговая характеристика CAT 777D  
Fig. 4. Traction characteristics of the CAT 777D

эксперимента. Результат расчета скорости движения груженого и порожнего автосамосвала в зависимости от удельного сопротивления движению представлен на рис. 5.

В результате многофакторного корреляционного анализа была получена формула для расчета скорости движения карьерного автосамосвала в зависимости от влияющих факторов:

$$\hat{v} = 110,983 - 1,8501x_1 - 3,7523x_2 - 2,381x_3 + 0,0583x_1^2 + 0,112x_2^2 + 0,0873x_3^2, \quad (8)$$

где  $\hat{v}$  — выходной параметр — скорость движения автосамосвала, км/ч;  $x_1$  — удельное сопротивление движению, н/т;  $x_2$  — уклон автодороги, %;  $x_3$  — загрузка автосамосвала, т.

### Заключение

Таким образом, в результате выполненных исследований решена актуаль-

ная задача разработки методического аппарата формирования научно обоснованных рекомендаций для выбора скоростного режима движения карьерных автосамосвалов в конкретных условиях применения, обеспечивающего повышение эффективности эксплуатации рудничного транспорта, а его применение позволило достичь следующих результатов.

1. Сформирован перечень наиболее значимых факторов и параметров, определяющих и характеризующих функционирование карьерных автосамосвалов, с учетом их значимости, для оценки существующих решений систем активного мониторинга.

2. Обоснован выбор скорости движения автосамосвала в качестве главного фактора, определяющего эффективность эксплуатации автосамосвалов и оказывающего непосредственное воздействие на техническое состояние машин.

3. Выявлены закономерности изменения скорости движения карьерного автосамосвала в зависимости от усло-



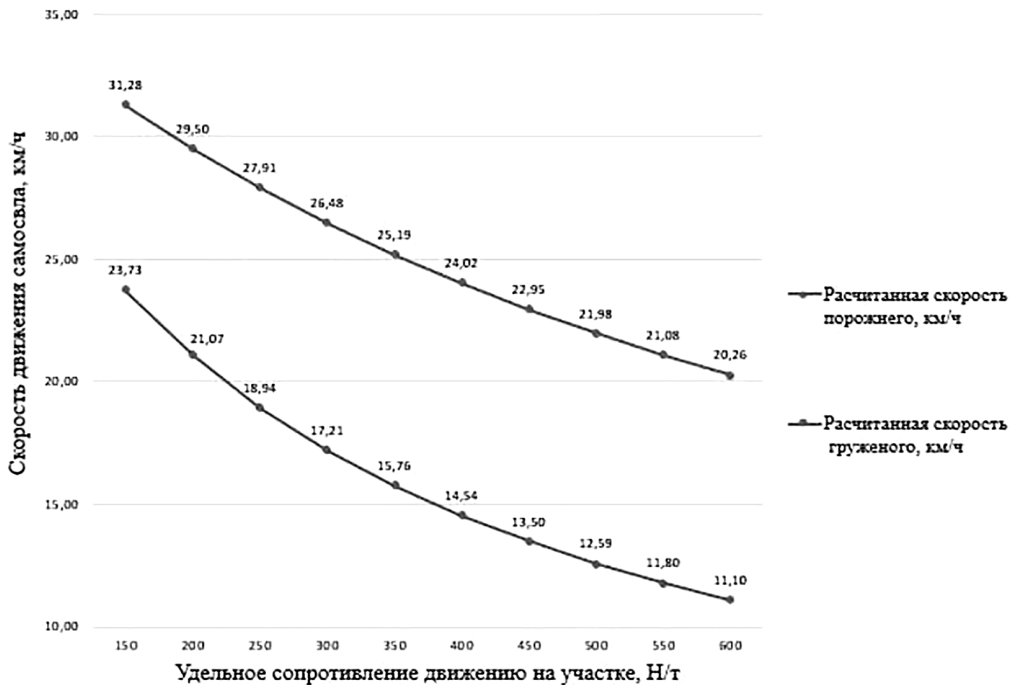


Рис. 5. Зависимости скорости движения груженого и порожнего автосамосвала от удельного сопротивления движению  
 Fig. 5. Dependences of speed of loaded and empty dump truck on specific resistance to motion

вй эксплуатации и технических характеристик машины.

4. Разработана прикладная программа для целей имитационного моделирования движения карьерного автосамосвала в конкретных условиях эксплуатации и определения влияния различных факторов на скорость движения автосамосвала.

5. Выполнено имитационное моделирование движения карьерного автосамосвала, позволившее получить расчетную формулу для определения скорости движения автосамосвала в зависимости от условий эксплуатации и технических характеристик машины на примере автосамосвала CAT 793D.

Вклад авторов:

Махараткин П. Н. — постановка цели задач исследования, определение

материалов и методов исследования при построении эффективной транспортной системы горнодобывающего предприятия методом имитационного моделирования.

Абдулаев Э. К. — ранжирование и поиск материалов по концепции построения транспортных систем горнодобывающего предприятия с анализом существующего опыта.

Вишняков Г. Ю. — разработана прикладная программа для ПК с вводом и выводом информации, принципиальная блок-схема с анализом существующих имитационных моделей систем контроля, систем мониторинга и диагностики.

Ботян Е. Ю. — анализ результатов имитационного моделирования, получение зависимостей скорости движения груженого и порожнего автосамосвала

от удельного сопротивления движению и подготовка данных.

*Пушкарев А. Е.* — выявлены закономерности изменения скорости движения карьерного автосамосвала в зависимости от условий эксплуатации и технических характеристик машины, многофакторный корреляционный анализ с получением

формулы для расчета скорости движения карьерного автосамосвала в зависимости от влияющих факторов.

Авторы заявляют, что у них нет конкурирующих, финансовых интересов или личных отношений, которые могли бы повлиять на работу, описанную в этой статье.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *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. 322–330. DOI: 10.31897/PMI.2019.3.322.

2. *Пушкарев А. Е., Максимова А. С.* Решение задачи формирования системы мониторинга состояния и позиционирования строительных и дорожных машин // – СПб.: ИД «Петрополис», 2021. — 108 с.

3. *Астафьев Ю. П., Полищук Г. К., Горлов Н. И.* Планирование и организация погрузочно-транспортных работ на карьерах // – М.: Недра, 1986. — 168 с.

4. *Глебов А. В.* Методические принципы выбора основного оборудования структур механизации циклично-поточной технологии // Горный информационно-аналитический бюллетень. — 2021. — № 5–2. — С. 296–308. DOI: 10.25018/0236\_1493\_2021\_52\_0\_296.

5. *Беликова Д. Д., Мороз Е. В., Хисамутдинова Э. Л.* Оптимальное управление силовыми агрегатами горных машин в диапазоне эксплуатационных режимов при применении системы контроля качества моторного масла // Горный информационно-аналитический бюллетень. — 2021. — № 6. — С. 95–103. DOI: 10.25018/0236\_1493\_2021\_6\_0\_95.

6. *Васильев М. В., Смирнов Ю. В.* Методика нормирования и планирования производительности карьерных автосамосвалов. – Свердловск: ИГД МЧМ СССР, 1987. — 40 с.

7. *Ворошилов Г. А.* Тенденции и перспективы применения карьерного автотранспорта на горнодобывающих предприятиях Уральского региона // Материалы науч.-практ. конф. «Карьерный транспорт 2002». Жодино: ПО «БелАЗ», 2002. — С. 50–52.

8. *Голубев В. А., Лотов А. И.* Пути экономии энергетических ресурсов при эксплуатации горно-транспортного оборудования карьеров // Труды ИГД МЧМ СССР. — 1986. — № 86. — С. 86–90.

9. *Гончаров С. А., Клюка Ф. И.* Пути снижения энергозатрат при разработке железорудных месторождений // Горный журнал. — 1999. — № 7. — С. 4–6.

10. *Довженок А. С.* Повышение эффективности карьерного автомобильного транспорта совершенствованием параметров его подсистем с использованием энергетического критерия: Автореф. дис. ... канд. тех. наук. — СПб.: Петербургский ин-т инж. железнодорож. транспорта, 1992. — 20 с.

11. *Зырянов И. В.* Алгоритм управления скоростным режимом карьерных автосамосвалов при низких температурах // Колыма. — 1997. — №1. — С. 55–57.

12. *Кулешов А. А., Ланков П. Ю., Серебренников О. Д.* Выбор рациональной модели карьерного самосвала для проектируемых карьеров ОАО «Апатит» // Горный информационно-аналитический бюллетень. — 2005. — № 11. — С. 267–274.

13. *Лель Ю. И., Мещерягин Ю. Б., Ребрин Е. Ю.* Исследование эксплуатации автосамосвалов различной грузоподъемности при доработке Карагайского карьера // Известия Уральского горного института. — 1993. — № 3. — С. 22–29.

14. *Kholmskiy A. V., Sidorov D. V.* Arrangements for increase the efficiency of mining operations on the deep ore mines. Scientific and Practical Studies of Raw Material Issues-

Proceedings of the Russian-German Raw Materials Dialogue: A Collection of Young Scientists Papers and Discussion. 2020. pp. 71–74.

15. *Потанов М. Г., Белозеров В. И., Левчик А. П.* Перспективы создания большегрузных карьерных авто самосвалов. — М.: ЦНИЭИуголь, 1986. — 44 с.

16. *Ребрин Е. Ю.* Моделирование режимов работы карьерного автотранспорта: Автореф. дис. ... канд. тех. наук. — Екатеринбург, 1995. — 18 с.

17. *Хохряков В. С.* Проектирование карьеров. — М.: Недра, 1980. — 336 с.

18. *Эткина Н. И., Лель Ю. И., Сандригайло И. Н.* Экспертные системы для оценки технологических параметров открытой разработки // Компьютерные технологии в горном деле. — 1996. — С. 138–142.

19. *Boyd G., Dutrow E., Tunnessen W.* The evolution of energy star energy performance Indicator for benchmarking industrial plant energy use // Journal of cleaner production. 2008, pp. 709–715.

20. *Болобов В. И., Плащинский В. А.* Влияние продолжительности удара на эффективность разрушения горных пород и пластического деформирования металлов // Горный информационно-аналитический бюллетень. — 2022. — № 3. — С. 78–96. DOI: 10.25018/0236\_1493\_2022\_3\_0\_78.

21. *Buki P., Nischk B.* Tightening the belt on production costs // Pit Quarry.d machines, <https://orcid.org/0000-0003-3395-935X>, Saint-Petersburg mining university, 199106, Russia, St Petersburg, 21st Line, 2, e-mail: evgenybotyan@yandex.ru

22. *Chadwick J. R.* Continuous miner and road header use grows // World Coal. 1983, vol. 9, pp. 31–40.

23. *Derzko N. A., Ugge A. J., Case E. R.* Evaluation of Dynamic Freeway Flow Model by Using Field Data. Transportation Research. 1981, vol. 905. pp. 52–60.

24. *Борисов С. В., Колтунова Е. А., Кладиев С. Н.* Совершенствование структуры имитационной модели тягового асинхронного электропривода рудничного электровоза // Записки Горного института. — 2021. — Т. 247. — С. 1–8. DOI: 10.31897/PMI.2021.1.12.

25. *Botyan E., Pushkarev A.* Improving the methodology of choosing machinery models for the formation of an excavator and vehicle fleet during the modernization of a mining transport system, with account for the Arctic specifics // Transportation Research Procedia. 2021, vol. 57, pp. 106–112.

26. *Абдулаев Э. К., Махараткин П. Н., Кужелев А. И.* Определение наиболее значимых факторов, влияющих на ресурс шин и редуктор мотор-колеса с помощью априорного ранжирования // Горный информационно-аналитический бюллетень. — 2019. — № 548. — С. 3–10.

27. *Хазин М. Л.* Роботизированные карьерные самосвалы // Известия Уральского государственного горного университета. — 2020. — № 3(59). — С. 123–130. DOI: 10.21440/2307-2091-2020-3-123-130.

28. *Рыльникова М. В., Власов А. В., Макеев М. А.* Обоснование условий применения автоматизированных систем управления открытыми горными работами строительства комплекса циклично-поточной геотехнологии в карьере с помощью имитационного моделирования // Горная промышленность. — 2021.— №4. — С. 106–112. DOI:10.30686/1609-9192-2021-4-106-112.

29. *Bajany D. M., Zhang L., Xia. X.* An optimization approach for shovel allocation to minimize fuel consumption in open pit mines: case of heterogeneous fleet of shovels // International Federation of Automatic Control. 2019, vol. 52, iss. 14, pp. 207–212. DOI: 10.1016/j.ifacol.2019.09.196.

30. *Patterson S. R., Kozana E., Hyland P.* Energy efficient scheduling of open-pit coal mine trucks // European Journal of Operational Research. 2017, vol. 262, pp. 759–770. DOI: 10.1016/j.ejor.2017.03.081.

31. *Burmistrov K. V., Osintseva N. A., Shakshakpaev A. N.* Selection of Open-Pit Dump Trucks during Quarry Reconstruction // *Procedia Engineering*. 2017, vol. 206, pp. 1696–1702. DOI: 10.1016/j.proeng.2017.10.700.
32. *Wang Q., Zhang R., Lv Sh., Wang Y.* Open-pit mine truck fuel consumption pattern and application based on multi-dimensional features and XGBoost // *Sustainable Energy Technologies and Assessments*. 2021, vol. 43, pp. 89–99. DOI: 10.1016/j.seta.2020.100977.
33. *Yan Q., Chen X., Jian H., Wei W., Wang W., Wang H.* Design of a deep inference framework for required power forecasting and predictive control on a hybrid electric mining truck // *Energy*, 2022, vol. 238. pp. 121–141. DOI: 10.1016/j.energy.2021.121960. **MIAB**

## REFERENCES

1. Safiullin R. N., Afanasyev A. S., Reznichenko V. V. Concept of development of monitoring and control systems of intelligent technical complexes. *Journal of Mining Institute*. 2019, vol. 237, pp. 322–330. [In Russ]. DOI:10.31897/PMI.2019.3.322.
2. Pushkarev A. E., Maksimova A. S. The solution of the problem of forming a system for monitoring the condition and positioning of construction and road vehicles St. Petersburg, Publishing house “Petropolis”, 2021, 108 p. [In Russ].
3. Astafiev Y. P., Polishchuk G. K., Gorlov N. I. Planning and organization of loading and transportation works in open pits. Moscow, Nedra, 1986, 168 p. [In Russ].
4. Glebov A. V. Methodological principles of equipment selection for cyclical-and-continuous technology mechanization. *MIAB. Mining Inf. Anal. Bull.* 2021, vol. 5–2, pp. 296–308. [In Russ]. DOI: 10.25018/0236\_1493\_2021\_52\_0\_296.
5. Belikova D. D., Morozov E. V., Khisamutdinova E. L. Optimizing control of mining machine power-units within the normal power setting range by means of engine oil quality monitoring. *MIAB. Mining Inf. Anal. Bull.* 2021, vol. 6, pp. 95–103. [In Russ]. DOI: 10.25018/0236\_1493\_2021\_6\_0\_95.
6. Vasiliev M. V., Smirnov V. P. *Method of rationing and planning of efficiency of open-pit dump trucks* Moscow, Sverdlovsk: IGD MCHM SSSR, 1987, 40 p. [In Russ].
7. Voroshilov G. A. Tendencies and prospects of using open-pit transport at mining enterprises of Ural region. *Materials of scientific and practical conference “Open Pit Transport 2002”* Zhodino: PO BelAZ. 2002. pp. 50–52. [In Russ].
8. Golubev V. A., Lotov A. I. *Ways to save energy resources in the operation of mining and transport equipment quarries. Sverdlovsk, IGD MHM USSR, no. 86, pp. 86–90.* [In Russ].
9. Goncharov S. A., Klucka F. I. *Ways to reduce energy costs in the development of iron ore deposits. Mining Journal.* 1999, no. 7, pp. 4–6. [In Russ].
10. Dovzhenok A. S. *Increase in efficiency of open-pit automobile transport by improving the parameters of its subsystems using the energy criterion. Abstract of Ph. D. thesis*, St. Petersburg., St. Petersburg Institute of Railway Transport, 1992, 20 p. [In Russ].
11. Zyryanov I. V. *Algorithm of controlling the speed mode of open-pit dump trucks at low temperatures. Kolyma*, 1997, no. 1, pp. 55–57. [In Russ].
12. Kuleshov A. A., Lankov P. Yu., Serebrennikov O. D. Choosing a rational model of a dump truck for the projected quarries of JSC Apatit. *MIAB. Mining Inf. Anal. Bull.* 2005, vol. 11, pp. 267–274. [In Russ].
13. Lel Y. I., Mescheryagin Yu. B., Rebrin E. Yu. *Research of operation of dump trucks of various payload capacity at the Karagaysky open pit. Proceedings of the Ural Mining Institute.* 1993, no. 3, pp. 22–29. [In Russ].
14. Kholmskiy A. V., Sidorov D. V. *Arrangements for increase the efficiency of mining operations on the deep ore mines. Scientific and Practical Studies of Raw Material Issues. Proceedings of the Russian-German Raw Materials Dialogue: A Collection of Young Scientists Papers and Discussion.* 2019, pp. 71–74.

15. Potapov M. G., Belozеров V. I., Levchik A. P. *Prospects of Creation of Heavy-Duty Open Pit Trucks*. – Moscow: Central Research Institute of Economics and Scientific and Technical Information of the Coal Industry. 1986, 44 p. [In Russ].
16. Rebrin E. Yu. Modelling of operation modes of open-pit motor transport. Abstract of Ph. D. thesis, Ekaterinburg, *Ural state mining and geological academy*, 1995, 220 p. [In Russ].
17. Khokhryakov V. S. Designing quarries, Moscow: Nedra, 1980, 336 p. [In Russ].
18. Etkina N. I., Lel Y. I., Sandrigailo I. N. Expert systems to assess technological parameters of opencast mining. *Computer technology in mining*. 1996. pp.138–142. [In Russ].
19. Boyd G., Dutrow E., Tunnessen W. The evolution of energy star energy performance Indicator for benchmarking industrial plant energy use. *Journal of cleaner production*. 2008, pp. 709–715.
20. Bolobov V. I., Plashchinsky V. A. Influence of impact duration on fracture efficiency in rocks and on plastic deformation of metals. *MIAB. Mining Inf. Anal. Bull.* 2022, no. 3, pp. 78–96. [In Russ]. DOI: 10.25018/0236\_1493\_2022\_3\_0\_78.
21. Buki P., Nischk B. Tightening the belt on production costs. *Pit Quarry*. 1986, vol. 7 no. 3, pp. 38–40.
22. Chadwick J. R. Continuous miner and road header use grows. *World Coal*. 1983, vol. 9, pp. 31–40.
23. Derzko N. A., Ugge A. J., Case E. R. Evaluation of Dynamic Freeway Flow Model by Using Field Data. *Transportation Research*. 1981, vol. 905, pp. 52–60.
24. Borisov S. V., Koltunova E. A., Kladiev S. N. Improving of Simulation Model Structure of Traction Asynchronous Electric Drive for Mine Electric Locomotive. *Journal of Mining Institute*. 2021, vol. 247, pp. 1–8. [In Russ]. DOI: 10.31897/PMI.2021.1.12.
25. Botyan E., Pushkarev A. Improving the methodology of choosing machinery models for the formation of an excavator and vehicle fleet during the modernization of a mining transport system, with account for the Arctic specifics. *Transportation Research Procedia*. 2021, vol. 57, pp. 106–112. [In Russ].
26. Abdulaev E. K., Maharatkin P. N., Kuzhelev A. I. Determination of the most significant factors affecting the life of tires and the motor-wheel gearbox using a priori ranking. *MIAB. Mining Inf. Anal. Bull.* 2019, no. 48, pp. 3–10. [In Russ].
27. Hazin M. L. Robotic mining dump trucks. *Proceedings of the Ural State Mining University*. 2020, no. 3(59), pp. 123–130. [In Russ]. DOI: 10.21440/2307-2091-2020-3-123–130.
28. Rylnikova M. V., Vlasov A. V., Makeev M. A. Substantiation of the conditions for the use of automated control systems for open-pit mining operations for the construction of a cyclic-flow geotechnology complex in a quarry using simulation modeling. *Mining industry*. 2021, no. 4, pp. 106–112. [In Russ]. DOI: 10.30686/1609-9192-2021-4-106–112.
29. Bajany D. M., Zhang L., Xia. X. An optimization approach for shovel allocation to minimize fuel consumption in open pit mines: case of heterogeneous fleet of shovels. *International Federation of Automatic Control*. 2019. vol. 52, iss. 14, pp. 207–212. DOI: 10.1016/j.ifacol.2019.09.196.
30. Patterson S. R., Kozana E., Hyland P. Energy efficient scheduling of open-pit coal mine trucks. *European Journal of Operational Research*. 2017, vol. 262, pp. 759–770. DOI: 10.1016/j.ejor.2017.03.081.
31. Burmistrov K. V., Osintseva N. A., Shakshakpaev A. N. Selection of Open-Pit Dump Trucks during Quarry Reconstruction. *Procedia Engineering*. 2017, vol. 206, pp. 1696–1702. DOI: 10.1016/j.proeng.2017.10.700.
32. Wang Q., Zhang R., Lv Sh., Wang Y. Open-pit mine truck fuel consumption pattern and application based on multi-dimensional features and XGBoost. *Sustainable Energy Technologies and Assessments*. 2021, vol. 43, pp. 89–99. DOI: 10.1016/j.seta.2020.100977.

33. Yan Q., Chen X., Jian H., Wei W., Wang W., Wang H. Design of a deep inference framework for required power forecasting and predictive control on a hybrid electric mining truck. *Energy*. 2022, vol. 238, pp. 121–141. DOI: 10.1016/j.energy.2021.121960.

## ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

*Махараткин Павел Николаевич* — доцент каф. ТТПИМ, <https://orcid.org/0000-0002-9376-061X>, Санкт-Петербургский горный университет, 199106, Санкт-Петербург, Васильевский остров, 21 линия, д.2, e-mail: [pavelnik@spmi.ru](mailto:pavelnik@spmi.ru);

*Абдулаев Эльдар Камильевич* — выпускник каф. ТТПИМ, <https://orcid.org/0000-0003-2326-8053>, Санкт-Петербургский горный университет, 199106, Санкт-Петербург, Васильевский остров, 21 линия, д.2, e-mail: [ehldarabdulaev@mail.ru](mailto:ehldarabdulaev@mail.ru);

*Вишняков Георгий Юрьевич* — аспирант каф. ТТПИМ, <https://orcid.org/0000-0001-5050-4491>, Санкт-Петербургский горный университет, 199106, Санкт-Петербург, Васильевский остров, 21 линия, д.2, e-mail: [geroibeka@yandex.ru](mailto:geroibeka@yandex.ru);

*Ботян Евгений Юрьевич* — аспирантка ф. ТТПИМ, <https://orcid.org/0000-0003-3395-935X>, Санкт-Петербургский горный университет, 199106, Санкт-Петербург, Васильевский остров, 21 линия, д.2, e-mail: [evgenybotyan@yandex.ru](mailto:evgenybotyan@yandex.ru);

*Пушкарев Александр Евгеньевич* — докт. техн. наук., профессор, <https://orcid.org/0000-0001-5546-015X>, Санкт-Петербургский государственный архитектурно-строительный университет (СПбГАСУ), 190005, Санкт-Петербург, 2-я Красноармейская ул., д. 4, Россия, e-mail: [pushkarev-agn@mail.ru](mailto:pushkarev-agn@mail.ru).

**Для контактов:** *Махараткин Павел Николаевич*, e-mail: [Pavelnik@spmi.ru](mailto:Pavelnik@spmi.ru).

## INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

*Makharatkin P. N.*, associate professor, department of transport and technological processes and machines, <https://orcid.org/0000-0002-9376-061X>, St. Petersburg Mining University, 199106, Russia, St Petersburg, 21st Line, 2, e-mail: [pavelnik@spmi.ru](mailto:pavelnik@spmi.ru);

*Abdulaev E. K.*, department of transport and technological processes and machines, <https://orcid.org/0000-0003-2326-8053>, Saint-Petersburg mining university, 199106, Russia, St Petersburg, 21st Line, 2, e-mail: [ehldarabdulaev@mail.ru](mailto:ehldarabdulaev@mail.ru);

*Vishnyakov G. Yu.*, PhD student, department of transport and technological processes and machines, <https://orcid.org/0000-0001-5050-4491>, Saint-Petersburg mining university, 199106, Russia, St Petersburg, 21st Line, 2, e-mail: [geroibeka@yandex.ru](mailto:geroibeka@yandex.ru);

*Botyan E. Yu.*, PhD student, department of transport and technological processes and machines, <https://orcid.org/0000-0003-3395-935X>, Saint-Petersburg mining university, 199106, Russia, St Petersburg, 21st Line, 2, e-mail: [evgenybotyan@yandex.ru](mailto:evgenybotyan@yandex.ru);

*Pushkarev A. E.*, Dr. Sci. (Eng.), professor, <https://orcid.org/0000-0001-5546-015X>, Saint-Petersburg State University of Architecture and Civil Engineering (SPbGASU), 190005, Saint-Petersburg, 2-ya Krasnoarmeyskaya St., 4, Russia, e-mail: [pushkarev-agn@mail.ru](mailto:pushkarev-agn@mail.ru)

**Corresponding author:** *Makharatkin P. N.*, e-mail: [Pavelnik@spmi.ru](mailto:Pavelnik@spmi.ru).

Получена редакцией 14.01.2022; получена после рецензии 07.04.2022; принята к печати 10.05.2022.

Received by the editors 14.01.2022; received after the review 07.04.2022; accepted for printing 10.05.2022.

