

УДК 622.684:004.94
DOI: 10.18799/24131830/2023/12/4308
Шифр специальности ВАК: 2.8.7

Компьютерное моделирование при оценке влияния дорожных факторов на производительность карьерного автотранспорта

А.Г. Журавлев✉, В.В. Черных

Институт горного дела Уральского отделения Российской академии наук, Россия, г. Екатеринбург

✉ juravlev@igduran.ru

Аннотация

Актуальность: необходимость оптимизации параметров горнотехнических систем на уровне современных научно-методических возможностей привела к разработке методического подхода к их описанию с учетом переходных процессов. При оптимизации жизненного цикла транспортных систем карьеров должны учитываться главным образом структурные переходные процессы, а на уровне отдельных ее элементов или оптимизации транспортных систем карьеров в процессе их эксплуатации требуют особого внимания переходные процессы параметрического характера. **Цель:** исследование возможностей программного обеспечения «Транспортная система карьера»; разработка подходов к оценке влияния дорожных факторов на производительность карьерного автотранспорта путем имитационного компьютерного моделирования; исследование закономерности влияния ограничений, связанных с взаимовлиянием автосамосвалов на ритмичность движения по автодорогам; исследование влияния дорожных факторов на производительность карьерных автосамосвалов. **Объекты:** карьер глубиной 380 м с производительностью по горной массе 125 млн т/год, с парком самосвалов в количестве 88 ед. Автосамосвалы обладают грузоподъемностью 136–220 т, экскаваторы – вместимостью ковша 15–35 м³. **Методы:** имитационного компьютерного моделирования функционирования транспортной системы карьера. Использовалась разработанная в Институте горного дела УрО РАН программа для ЭВМ «Транспортная система карьера». **Результаты.** ПО «Транспортная система карьера» позволяет решать специфические задачи в области карьерного транспорта, связанные в том числе с оценкой влияния дорожных факторов на технико-экономические показатели карьерного автотранспорта; выработаны подходы к оценке влияния дорожных факторов на производительность карьерного автотранспорта; установлена закономерность влияния ограничений, связанных с взаимовлиянием автосамосвалов, на ритмичность движения по автодорогам; установлено влияние дорожных факторов на производительность карьерных автосамосвалов.

Ключевые слова: имитационное компьютерное моделирование, производительность карьерного автотранспорта, дорожные условия в карьере, среднетехническая скорость, карьерный автосамосвал.

Благодарности: Исследования выполнены в рамках Государственного задания № 075-00412-22 ПР. Методологические основы стратегии комплексного освоения запасов месторождений твердых полезных ископаемых в динамике развития горнотехнических систем (FUWE-2022-0005), пер. № 123012300005-3

Для цитирования: Журавлев А.Г., Черных В.В. Компьютерное моделирование при оценке влияния дорожных факторов на производительность карьерного автотранспорта // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. – 2023. – Т. 334. – № 12. – С. 20–31. DOI: 10.18799/24131830/2023/12/4308

UDC 622.684:004.94
DOI: 10.18799/24131830/2023/12/4308

Computer modeling when assessing the impact of road factors on performance of quarry vehicles

A.G. Zhuravlev✉, V.V. Chernykh

Institute of Mining of the Ural Branch of the Russian Academy of Sciences, Yekaterinburg, Russian Federation

✉ juravlev@igduran.ru

Abstract

Relevance. The need to optimize the parameters of mining systems at the level of modern scientific and methodological capabilities, which leads to development of a methodological approach to their description taking into account transients. When optimizing the life cycle of quarry transport systems, mainly structural transients should be taken into account. At the level of its individual elements or optimization of quarry transport systems during their operation, special attention should be paid to parametric transients. **Aim.** To study the capabilities of the software "Quarry Transport System"; to develop approaches to assessing the impact of road factors on performance of quarry vehicles by simulation; to study the regularity of the influence of restrictions associated with the mutual influence of dump trucks on the rhythm of traffic on auto roads; to study the impact of road factors on the performance of dump trucks. **Objects.** Quarry with a depth of 380 m with a capacity of 125 million tons/year, with a fleet of dump trucks in the amount of 88 units. Dump trucks have a lifting capacity of 136–220 tons, excavators with a bucket capacity of 15–35 m³. **Methods.** Computer simulation of quarry transport system functioning; the computer program "Quarry Transport System" developed at the Institute of Mining of the Ural Branch of the Russian Academy of Sciences. **Results.** The "Quarry Transport System" software allows solving specific problems in the field of career transport, including those related to the assessment of the impact of road factors on technical and economic indicators of career vehicles. The authors have developed the approaches to assessing the impact of road factors on performance of career vehicles. They established the regularity of the influence of restrictions associated with the mutual influence of dump trucks on the rhythm of traffic on auto roads and the influence of road factors on performance of dump trucks.

Keywords: simulation computer modeling, performance of quarry vehicles, road conditions in a quarry, average technical speed, quarry dump truck.

Acknowledgements: The research was carried out within the framework of the State Task No. 075-00412-22 PR. Methodological foundations of the strategy of integrated development of reserves of solid mineral deposits in the dynamics of development of mining systems (FUWE-2022-0005), reg. No. 123012300005-3.

For citation: Zhuravlev A.G., Chernykh V.V. Computer modeling when assessing the impact of road factors on performance of quarry vehicles. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Geo Assets Engineering*, 2023, vol. 334, no. 12, pp. 20–31. DOI: 10.18799/24131830/2023/12/4308

Введение

Необходимость оптимизации параметров горно-технических систем на уровне современных научно-методических возможностей привела к разработке методического подхода к их описанию с учетом переходных процессов (ПП) [1]. При оптимизации жизненного цикла транспортных систем карьеров (ТСК) должны учитываться главным образом структурные ПП, а на уровне отдельных ее элементов или оптимизации ТСК в процессе их эксплуатации требуют особого внимания ПП параметрического характера [2]. К разновидности задач, решаемых при оптимизации параметрических ПП, относится учет дорожных факторов при эксплуатации карьерного автотранспорта.

Проблема характерна для горнодобывающих предприятий с высоким грузооборотом, где значительное влияние на производительность карьерного автотранспорта оказывают дорожные факторы. Под дорожными факторами в данной статье понимаются параметры (уклон, ширина, радиус поворота и т. п.) и состояние (ровность, коэффициенты сопротивления качению и сцепления колес с поверхностью) автодорог, их конфигурация, режим выполнения работ по обслуживанию автодорог и привлекаемая для этого техника, образование заторов на автодорогах и т. п.

Задачи определения производительности транспортных систем карьеров (ТСК) являются сложными, поскольку на работу карьерных автосамосвалов влияет большое количество факторов: параметры, конфигурация и состояние автодорог, состояние автосамосвалов и их технические характеристики, организация дорожного движения, параметры, условия и режим работы погрузочных средств, параметры и режим работы приемных/перегрузочных складов, бункеров, отвалов. Поэтому продолжительность рейса карьерных автосамосвалов, рассчитанная по их номинальным характеристикам, изменяется в процессе движения из-за: ухудшенного состояния участков автодорог, помех на пути следования, осложненного разезда, потери времени в ожидании погрузки при скоплении очередей у погрузочных машин и т. п.

Очевидно, что закономерности в этой части являются многофакторными и нелинейными. Решение задачи определения производительности транспортной системы карьера может быть: упрощенным, сложно-аналитическим и на базе имитационного компьютерного моделирования (табл. 1). Для учета наибольшего многообразия факторов самоорганизации системы с высокой точностью, учитывая развитие компьютерных технологий, в настоящее время наиболее целесообразно применять методы имитационного компьютерного моделирования.

Таблица 1. Краткий анализ способов определения производительности транспортной системы карьера
Table 1. Brief analysis of ways to determine the performance of a quarry transport system

Способ Method	Описание Description	Примеры Examples	Преимущества Advantages	Недостатки Disadvantages
Упрощенный Simplified	Через расчет продолжительности рейса автосамосвала по тягово-динамическим характеристикам и нормированному времени погрузки либо аналогичным образом Through the calculation of duration of the dump truck journey according to traction and dynamic characteristics and normalized loading time, or in a similar way	[3–5]	1) простота расчетов; 2) приемлемая точность в линейной области изменения производительности ТСК от основных факторов 1) simplicity of calculations; 2) acceptable accuracy in the linear range of changes in quarry transport system performance from the main factors	Недоучет факторов, ошибка 5–10 %, в отдельных случаях до 20 %; неучет нелинейности производительности от количества самосвалов на линии и др. параметров, что приводит к ошибке до 50 % и более в данной области значений факторов Underestimation of factors, error 5–10%, in some cases up to 20%; failure to take into account the nonlinearity of productivity from the number of dump trucks on the line and other parameters, which leads to an error of up to 50% or more in this area of factor values
Сложно-аналитический Complex-analytical	Через построение математической модели функционирования транспортной системы карьера, например: на теории массового обслуживания, на эмпирических мат. моделях (зависимостях) Through the construction of a mathematical model of functioning of the quarry transport system, for example: on the theory of queuing, on empirical mathematical models (dependencies)	[6–11]	1) достаточно высокая точность результатов, учет нелинейности зависимости производительности от определяющих факторов; 2) трудоемкость разработки мат. модели ниже, чем программы для ЭВМ; 3) может быть реализовано расчетным методом без написания программы для ЭВМ 1) sufficiently high accuracy of the results, taking into account the nonlinearity of the dependence of performance on determining factors; 2) development of a mathematical model is less complex than computer programs; 3) can be implemented by the calculation method without writing a computer program	1) имеется ряд факторов, не учитываемых моделью (погрешность метода); 2) требует сложной математики, ее проверки и отладки; 3) для более точного учета факторов мат. модель должна формироваться под каждый конкретный карьер и вариант его развития 1) there are a number of factors that are not taken into account by the model (method error); 2) requires complex mathematics, its verification and debugging; 3) for more accurate consideration of the factors the mathematical model should be formed for each specific career and its development option
Имитационное компьютерное моделирование Computer simulation	Воспроизведение функционирования ТСК по принципу «как есть» на основе объектно-ориентированного (мультиагентного) подхода Reproduction of the functioning of the quarry transport system on the principle of "as it is" based on an object-oriented (multi-agent) approach	[12–19]	1) имеет минимальную погрешность метода для данной задачи; 2) позволяет относительно просто и быстро варьировать факторы (количество самосвалов, экскаваторов, длина автодорог и т. п.) без коренной переделки модели 1) has the minimum error of the method for this task; 2) allows you to vary factors relatively simply and quickly (the number of dump trucks, excavators, the length of roads, etc.) without radically altering the model	Высокая трудоемкость разработки и отладки программы для ЭВМ High complexity of computer program development and debugging

В последнее десятилетие в России и странах ближнего зарубежья сформировалась особая группа горнодобывающих предприятий с открытым способом разработки, которые достигают эффективности при разработке относительно бедных или геологически сложных месторождений глубокими карьерами за счет больших объемов переработки. Они характеризуются высокой производственной мощностью и соответствующей высокой интенсивностью технологических грузоперевозок. Для таких карьеров во-

прос обеспечения производительности автомобильного транспорта является одним из ключевых, поскольку даже второстепенные факторы могут вызывать риск недостижения плановых показателей.

Цель исследования – установление закономерностей изменения производительности автотранспортной системы глубокого карьера с высокой интенсивностью грузопотоков от количества работающих автосамосвалов и дорожных условий и отработка методики решения такого рода задач.

Методы исследования

Исследования выполнялись методом имитационного компьютерного моделирования функционирования транспортной системы карьера. Использовалась разработанная в Института горного дела УрО РАН программа для ЭВМ «Транспортная система карьера» (ПО «ТСК») [20, 21]. Для моделирования в ПО «ТСК» сформирована база данных с характеристиками техники (табл. 2) и положением карьерных автодорог.

Имитационное моделирование применялось в качестве экспериментального инструмента исследований для решения следующих задач:

- 1) определение предельной достижимой производительности карьерного автотранспорта в зависимости от количества работающих автосамосвалов и среднего расстояния транспортирования;
- 2) установление закономерностей изменения средней скорости движения карьерных автосамосвалов в зависимости от ограничения максимальной скорости и количества участков с таким ограничением (имитирует снижение скорости от работ, выполняемых на участке автодороги, а также его ухудшенное состояние);
- 3) выявление влияния работы техники, обслуживающей автодороги (грейдеры, колесные бульдозеры), на производительность карьерных автосамосвалов;
- 4) выявление влияния работ по ремонту участков автодорог на снижение производительности карьерного автотранспорта.

Форма карьера и транспортных коммуникаций в нем и за его пределами сформирована исходя из следующих соображений:

- за основу взяты параметры глубоких карьеров при разработке крутопадающих месторождений округлой формы (алмазородные карьеры, некоторые карьеры по добыче цветных металлов и золота);
- нижняя часть карьера вскрывается единственным капитальным автосъездом (для сокращения объема вскрыши в конечном контуре), а верхняя часть – системой из двух совокупностей капитальных съездов, опоясывающих верхние горизонты (для безопасности, повышения производительности автотранспорта за счет распределения грузопотоков);
- параметры транспортных коммуникаций приняты в соответствии с действующими в России нормами (руководящий уклон 8 %, ширина и элементы продольного профиля – по СП 37.13330);
- рабочие горизонты сосредоточены только в нижней части карьера, предусмотрены 13 забоев.

Состояние автодорог в конечном итоге оказывает свое влияние на производительность технологического автотранспорта через снижение скорости движения, вызванное неудовлетворительным состоянием поверхности дорог (неровности, скользкость, пыление и т. п.). Поэтому решение задачи будет универсальным, если задаться рядом ограничений предельной скорости движения на участках и процентом таких участков в общем расстоянии транспортирования.

Таблица 2. Виды техники, учтенные в имитационной модели «ТСК»

Table 2. Types of equipment taken into account in the simulation model "Quarry transport system"

Техника Machines	Количество и расположение при моделировании Quantity and location in modeling
Автосамосвалы карьерные Quarry dump trucks	Грузоподъемностью 220 т – от 48 до 102 ед., грузоподъемностью 136 т – от 30 до 66 ед. With a load capacity of 220 tons – from 48 to 102 units, with a load capacity of 136 tons – from 30 to 66 units
Экскаваторы карьерные гусеничные Crawler quarry excavators	Все экскаваторы отгружают горную массу из забоев в нижней рабочей зоне карьера: прямая лопата с объемом ковша 35 м ³ – 4 ед., прямая лопата с объемом ковша 20 м ³ – 2 ед., прямая лопата с объемом ковша 16 м ³ – 2 ед., прямая лопата с объемом ковша 10 м ³ – 3 ед. All excavators ship rock mass from the faces in the lower working area of the quarry: a straight shovel with a bucket volume of 35 m ³ – 4 units, a straight shovel with a bucket volume of 20 m ³ – 2 units, a straight shovel with a bucket volume of 16 m ³ – 2 units, a straight shovel with a bucket volume of 10 m ³ – 3 units
Погрузчики фронтальные Front loaders	Отгрузка горной массы из забоев в нижней рабочей зоне карьера. Вместимость ковша 20 м ³ , масса 243 т – 1 ед., вместимость ковша 12 м ³ , масса 116 т – 1 ед. Shipment of rock mass from the faces in the lower working area of the quarry. Bucket capacity 20 m ³ , weight 243 tons – 1 unit, bucket capacity 12 m ³ , weight 116 tons – 1 unit
Бульдозеры колесные Wheeled bulldozers	Зачистка площадок забоев, очистка временных автодорог в нижней рабочей зоне карьера от просыпей. Мощность двигателя 535 кВт, эксплуатационная масса 49,1 т – 5 ед. Cleaning of face sites, cleaning of temporary roads in the lower working area of the quarry from spills. The engine power is 535 kW, the operating weight is 49.1 tons – 5 units
Автогрейдеры особо тяжелого типа Motor graders of a particularly heavy type	Патрульная очистка дорог, обновление противогололедного щебня. Ширина отвала 7,3 м, масса 73 т – 2 ед. Ширина отвала 3,7 м, масса 20,5 т – 5 ед. Patrol cleaning of roads, updating of deicing rubble. Blade width is 7.3 m, weight 73 t – 2 units. Blade width is 3.7 m, weight 20.5 t – 5 units

Для моделирования заданы следующие условия (рис. 1):

- моделирование осуществляется в течение 24 часов виртуального времени (выполнена проверка по нескольким вариантам на продолжительность моделирования 7 суток, показавшая высокую сопоставимость результатов с вариантами 24 ч);
- контролируемые показатели (скорости в груженом и порожнем направлениях, суммарный объем перевезенной горной массы, продолжительность транспортного цикла) определялись для нескольких автосамосвалов разных моделей, началом отсчета транспортного цикла выбран момент установки автосамосвала под погрузку;

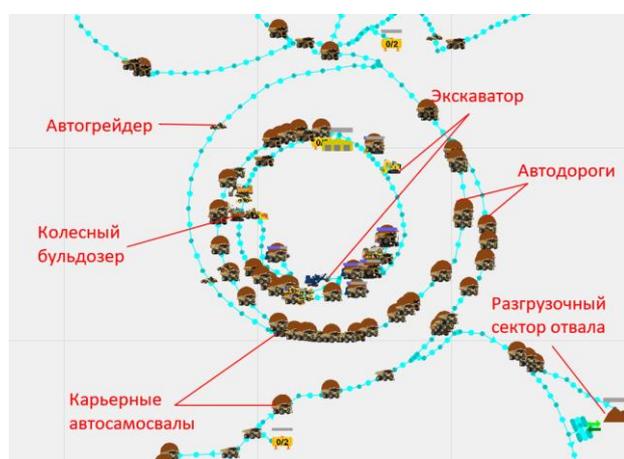


Рис. 1. Визуализация модели транспортной системы карьера в окне программы «ТСК»

Fig. 1. Visualization of the quarry transport system model in the "Quarry transport system" program window

- ограничение скорости задается по следующему принципу: заданное количество участков имеет установленное ограничение из ряда 40, 30, 20, 10 км/ч, на остальных участках принята максимальная разрешенная скорость (40 км/ч на верхних горизонтах и на поверхности, 30 км/ч на нижних горизонтах, на поворотах 15–20 км/ч в зависимости от их крутизны), при этом фактическая скорость определяется с учетом тягово-динамических возможностей автосамосвалов на каждом конкретном участке автодороги;
- в конце каждой смены автосамосвалы движутся после разгрузки к месту пересменки, а после ее окончания возвращаются в работу на маршруте;
- продолжительность погрузки самосвала рассчитывается с учетом вместимости грузовой платформы автосамосвала и ковша погрузочного средства;

- за базовый принят вариант с ограничением скорости 40 км/ч по всей длине маршрута;
- при воспроизведении работы автогрейдеров они курсировали по автодорогам согласно заданным маршрутам, при этом их скорость составляла 4–10 км/ч в зависимости от режима движения и параметров каждого конкретного участка автодороги; их объезд возможен автосамосвалами только при отсутствии машин во встречном движении, что имитировало создание помех движению в реальных условиях работы в карьере;
- аналогично имитировалась работа колесных бульдозеров, но с учетом того, что зона из движения ограничивалась рабочими горизонтами карьера.

Идентичность исходных условий для сравниваемых вариантов обеспечена благодаря функции сохранения состояния транспорта в ПО «ТСК»: моделирование начиналось от одного и того же сохраненного положения транспортной системы и заканчивалось ровно через 24 ч по автоматическому таймеру.

Результаты и их анализ

Установление закономерности изменения производительности выполнено на модели карьера, параметры которого приведены в табл. 3, а конфигурация автодорог – на рис. 1. Автосамосвалы работали по комбинированной схеме закрепления: каждому из них был задан перечень экскаваторов, под которыми допускается погрузка, а определение конкретного из них выполнялось автоматически с учетом минимизации очередей самосвалов в ожидании погрузки и относительно равномерного распределения объема выемки между забоями. Различался тип горной массы по забоям: руда возилась на склад, а вскрыша – в отвалы. Производительность оценивалась валово по всему парку работающих автосамосвалов.

Из рис. 2 видно, что закономерность изменения производительности автотранспорта имеет эффект насыщения – снижение интенсивности нарастания объема перевезенной горной массы после достижения определенного количества работающих автосамосвалов [13]. Теоретический предел этой кривой – максимальная суммарная эксплуатационная производительность всех работающих экскаваторов с учетом горнотехнических условий забоев и ожидания обмена самосвалов. Для карьеров же с высокой интенсивностью грузопотоков и насыщение проявляется гораздо раньше за счет существенного влияния таких факторов, как: затруднение разминок при увеличении количества автосамосвалов, увеличение простоев в очередях на погрузку, формирование очередей на пунктах разгрузки и т. п.

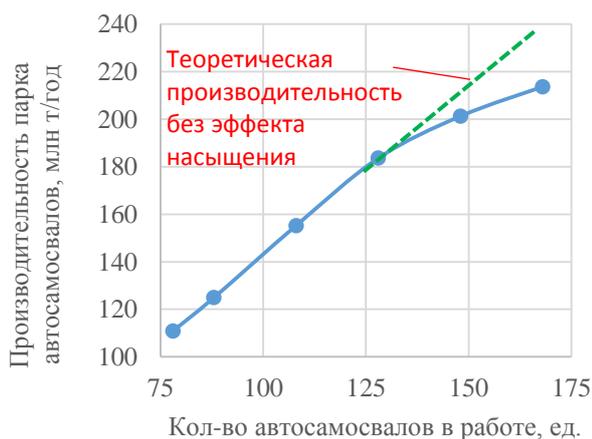
Таблица 3. Основные параметры моделируемых карьеров
Table 3. Main parameters of simulated quarries

Параметр Parameter	Значение Value
Степень стесненности рабочей зоны Tightness of a working area	Разветвленные автодороги с двумя капитальными съездами в верхней части и одним в нижней зоне карьер Branched auto roads with two major exits in the upper part and one in the lower area of the quarry
Номинальная производительность по горной массе, млн т/год Nominal productivity by rock mass, million tons/year	125
Номинальный парк самосвалов (всего), ед. (на номинальную производительность карьера по горной массе) Nominal dump truck fleet (total), units (for the nominal productivity of the quarry by rock mass)	88
из них: грузоподъемностью 136 т грузоподъемностью 220 т including: carrying capacity of 136 tons carrying capacity of 220 tons	~38 % ~62 %
Длина карьера, м Quarry length, m	1795
Ширина карьера, м Quarry width, m	1962
Глубина карьера, м Quarry depth, m	380
Общая протяженность автодорог, км Total length of auto roads, km	28,3
Грузоподъемность применяемых автосамосвалов, т Load capacity of the used dump trucks, tons	130–220

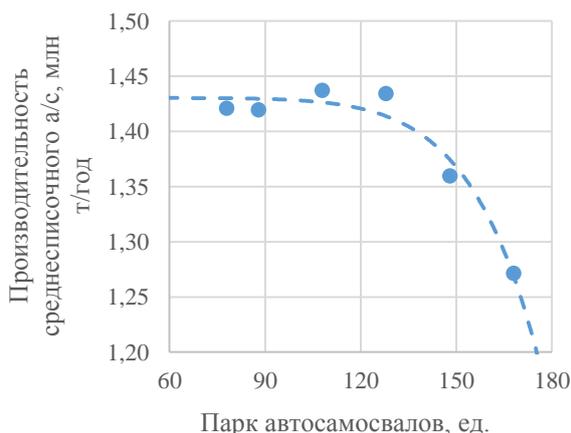
Как видно из рис. 2, эффект насыщения начинает проявляться при количестве автосамосвалов более 130 ед. Существенную проблему (падение производительности более чем на 10 %) данный эффект создает при количестве автосамосвалов свыше 150 ед. Наглядно (рис. 2, б) эта проблема видна по падению производительности среднесписочного самосвала. Здесь некоторое увеличение производительности в диапазоне 90–130 самосвалов связано со случайным явлением – для большего количества самосвалов алгоритм давал более рациональное распределение самосвалов по экскаваторам. В целом же закономерность производительности описывается нелинейной убывающей функцией (показана пунктиром).

Приведенная на графиках рис. 2 производительность автотранспорта достижима при хорошем состоянии автодорог. На практике же ее ограничивают дорожные условия, которые для целей данного исследования учитываются в трех видах:

- снижение скорости движения из-за ухудшенного состояния автодорог;
- помехи движению карьерных автосамосвалов от курсирующей техники по обслуживанию автодорог (выполнено на примере автогрейдеров);
- помехи карьерных автосамосвалов на ремонтируемых участках автодорог (снижение скорости вплоть до остановки, вызванной необходимостью разминовки в условиях работающей дорожно-строительной техники и заужения полосы для проезда).



а/а



б/б

Рис. 2. Максимальная достигнутая производительность карьерных автосамосвалов при перевозке горной массы по результатам моделирования: а) в целом по парку самосвалов; б) одного среднесписочного самосвала

Fig. 2. Maximum achieved productivity of dump trucks during transportation of rock mass according to the simulation results: а) in the whole dump truck fleet; б) one medium-sized dump truck

Влияние ухудшенного состояния автодорог на снижение производительности оценивалось через снижение скорости. Как известно из исследований [22], снижение скорости имеет зависимость от глубины неровностей. С учетом этого выполнено моделирование движения автосамосвалов по вариантам с варьированием ограничения скорости и разной длиной участков с таким ограничением (на всех участках скорость ограничивалась на одну и ту же величину). Протяженность участков с ухудшенным состоянием дороги оценивалась как доля их суммарной длины в общем расстоянии транспортирования. Движение моделировалось на единственной трассе от забоя до отвала. За базовый принят вариант с допустимой скоростью 40 км/ч на всех участках, при этом фактическая скорость определялась в модели с учетом уклона участков и тягово-динамических характеристик самосвалов.

Полученные результаты, приведенные в табл. 4 и на рис. 3, демонстрируют как увеличение продолжительности рейса, так и нелинейное снижение скорости относительно базового варианта. Характер этого снижения одинаков для автосамосвалов как 136, так и 220 т, и в процентном отношении (рис. 3, а) практически совпадает, что соответствует очевидной теоретической закономерности. Однако конкретная форма графиков несколько различается из-за различных тягово-динамических характеристик рассмотренных машин. Такой факт говорит о хорошей детальности разработанной имитационной модели, позволяющей учитывать указанные нюансы.

В абсолютном выражении снижение скорости влияет на производительность самосвалов по-разному, в зависимости от их грузоподъемности (рис. 4). Отмечено, что падение производительности

тем интенсивнее, чем ниже ограничение скорости, причем наибольшее снижение наблюдается при ограничении менее 10–15 км/ч. Это связано с тем, что значительную долю времени рейса автосамосвал движется на подъем с грузом, при этом скорость в силу тягово-динамических свойств машины составляет 10–15 км/ч, не достигая пределов ограничения скорости (например, 30 км/ч), а следовательно, это ограничение влияет на продолжительность рейса только в порожняковом направлении. В целом же падение производительности от ограничения скорости изменяется с меньшей кратностью: например, при снижении ограничения скорости в 4 раза (с 40 до 10 км/ч) производительность падает в 2 раза.

Таблица 4. Результаты моделирования продолжительности рейса карьерных автосамосвалов при дальности транспортирования 8,5 км
Table 4. Results of modeling the duration of the trip of dump trucks with a transportation range of 8.5 km

Грузоподъемность самосвалов Loading capacity of dump trucks	Продолжительность рейса, ч Trip duration, h				
	% участков со сниженной скоростью % of sites with reduced speed	Ограничение скорости, км/ч Speed limit, km/h			
		10	20	30	40
136 т/т	10	0:53:45	0:48:43	0:47:33	0:46:59
	30	1:01:13	0:51:39	0:48:57	0:46:59
	50	1:11:22	0:56:19	0:49:39	0:46:59
	70	1:22:13	0:58:17	0:50:33	0:46:59
	90	1:33:53	1:01:42	0:51:55	0:46:59
220 т/т	10	0:52:47	0:50:30	0:48:28	0:46:32
	30	1:01:06	0:51:57	0:47:41	0:46:32
	50	1:10:16	0:54:38	0:48:45	0:46:32
	70	1:21:05	0:57:10	0:49:47	0:46:32
	90	1:33:09	0:59:51	0:51:55	0:46:32

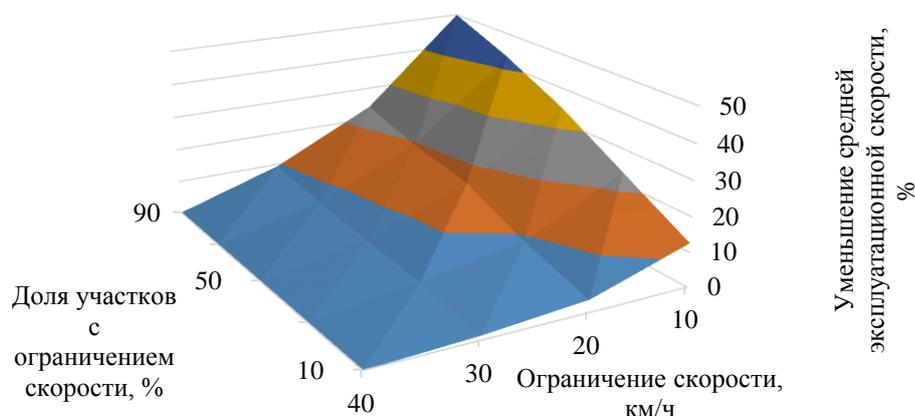


Рис. 3. Снижение средней эксплуатационной скорости карьерных автосамосвалов в зависимости от ограничения скорости и доли участков с таким ограничением

Fig. 3. Reduction of the average operating speed of dump trucks depending on speed limit and proportion of sites with such a restriction

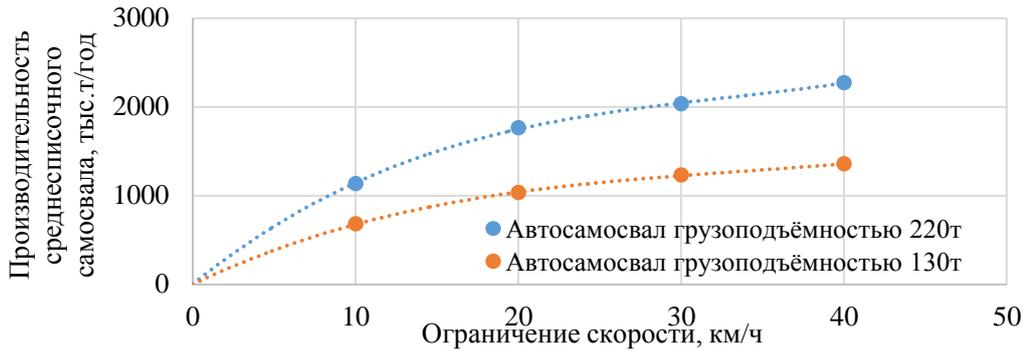


Рис. 4. Изменение производительности от ограничения скорости для автосамосвалов различной грузоподъемности при дальности транспортирования 8 км и средневзвешенном уклоне по маршруту следования 4,5 % (для доли участков с ограничением скорости 90 % от длины маршрута)

Fig. 4. Change in performance because of speed limit for dump trucks of various load capacities with a transportation distance of 8 km and a weighted average slope along the route of 4.5% (for proportion of sites with a speed limit of 90% of the route length)

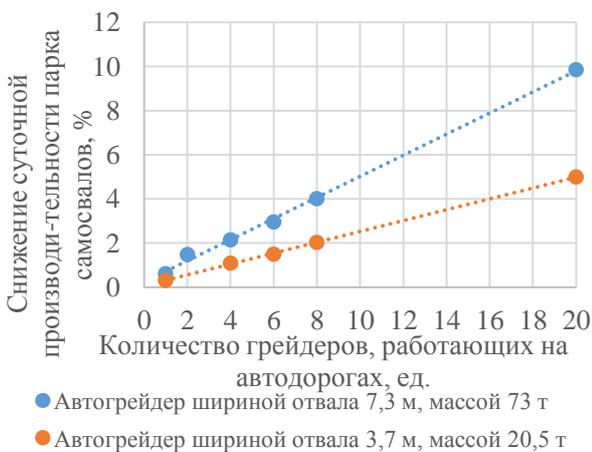
Влияние курсирующей техники по обслуживанию автодорог (автогрейдеров) оценивалось путем моделирования работы автосамосвалов на всей сети автодорог по открытой схеме (в части «привязки» к экскаваторам). Сопоставлялись показатели средней скорости движения автосамосвалов и перевезенной горной массы по вариантам: без автогрейдеров и с автогрейдерами. Автогрейдерам были определены маршруты, охватывающие всю сеть автодорог, при этом с большей интенсивностью они двигались в пределах карьера на дорогах с наибольшим грузооборотом. Работа грейдеров создавала следующие помехи:

- замедление при следовании за работающим в патрульном режиме грейдером;
- остановка для пропуска встречного движения при объезде грейдера, работающего в режиме участковой зачистки дороги;

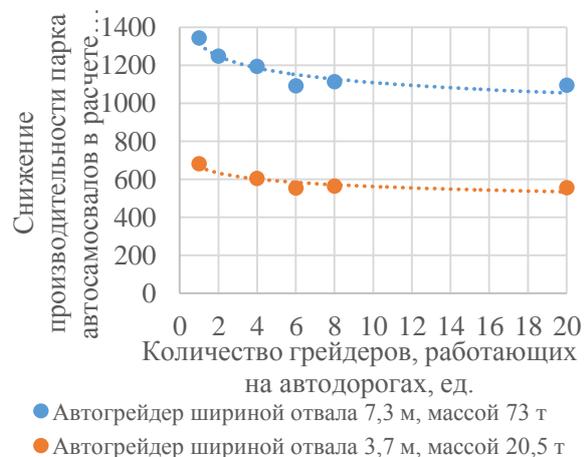
- снижение скорости вплоть до остановки при создании заторов из-за работающих грейдеров в зонах интенсивных грузопотоков (в рабочей зоне карьера) и на перекрестках.

Все это приводило к стохастическому увеличению продолжительности рейса автосамосвалов, которое в среднем по парку автосамосвалов составило 2–4 %, а в отдельных случаях – до 10 %.

Из рис. 5 видно, что суточный объем перевозок парком карьерных автосамосвалов падает несущественно: по варианту с грейдерами шириной отвала 7,3 м – на 2,0–2,3 % при рациональном их количестве 3 ед. и по варианту с грейдерами шириной отвала 3,7 м – на 2,5–3,0 % при рациональном их количестве 8–9 ед. Тем не менее определенный вклад в общее снижение производительности автопарка они вносят.



a/a



б/б

Рис. 5. Снижение производительности парка автосамосвалов от фактора помех курсирующих автогрейдеров: а) суммарно на парк; б) в расчете на один грейдер

Fig. 5. Decrease in performance of the dump truck fleet depending on interference factor of cruising graders: a) in total per park; b) per a grader

Также видно, что автогрейдеры меньшего класса по габаритам при том же количестве создают меньше помех, чем автогрейдеры большего класса (рис. 5, б). Это, очевидно, происходит из-за более простого их объезда ввиду меньших габаритов. В то же время для эффективного поддержания хорошего состояния автодорог грейдеров меньшего класса требуется больше из-за меньшей производительности (ширины и глубины резания). В итоге грейдеров класса 20,5 т требуется в 2–2,5 раза больше, чем машин класса 73 т, и их общие помехи для движения самосвалов сравнимы или больше, чем помехи от тяжелых машин.

Наряду с патрульным обслуживанием автодорог грейдерами и колесными бульдозерами выполнено имитационное моделирование, описывающее локальный ремонт участка дороги. На ограниченном участке предусматривалась работа дорожно-строительной техники, при которой возможен ее объезд по одной из полос автодороги; это создавало помехи для движения технологического большегрузного автотранспорта, вызывая скопление самосвалов с обеих сторон от ремонтируемого участка. Длина ремонтируемого отрезка дороги принималась 150 м, также фиксировались параметры движения самосвалов на смежных к нему отрезках длиной 150–170 м, где наблюдалось их скопление и снижение скорости.

Таблица 5. Снижение производительности карьерных автосамосвалов в условиях ремонта участка автодороги длиной 450 м на пути следования

Table 5. Decrease in performance of dump trucks in the conditions of repair of a 450 m long auto road section on the route

Общее расстояние транспортирования, км Total transportation distance, km	По варианту с ремонтом участка дороги длиной 450 м According to the option with the repair of a 450 m long road section			
	Продолжительность рейса, ч Trip duration, h	Производительность 1 автосамосвала, т/сут. Efficiency of 1 dump truck, t/day	Потеря производительности на 1 автосамосвал Loss of performance per 1 dump truck	
			t/day	%
2	0,41	9855	2415	20
4	0,65	6189	873	12
6	0,90	4511	447	9
8	1,14	3548	271	7
10	1,39	2925	181	6

Заключительным видом виртуальных испытаний была оценка влияния ремонтных работ на автодороге при условии закрытия одной из полос с поочередным движением самосвалов по другой. По результатам моделирования установлено, что про-

стой самосвалов в ожидании проезда по ремонтируемому участку дороги составляет от 0,5 до 5 мин. Средние показатели по работе парка автосамосвалов в целом за сутки в условиях ремонтных работ приведены в табл. 5. Видно, что при коротком плече откатки ремонтные работы на участке длиной 450 м вызывают существенное снижение суточного объема перевозок парком автосамосвалов 20 %. По мере возрастания дальности транспортирования эта величина уменьшается до 6 %.

Выводы

1. Разработанное в ИГД УрО РАН программное обеспечение «Транспортная система карьера» позволяет решать специфические задачи в области карьерного транспорта, связанные в том числе с оценкой влияния дорожных факторов на технико-экономические показатели карьерного автотранспорта.
2. Выработаны подходы к оценке влияния дорожных факторов на производительность карьерного автотранспорта путем имитационного компьютерного моделирования:
 - внедрение в модель агентов, имитирующих работу дорожной техники;
 - внедрение в модель элементов, имитирующих состояние проезжей части дорог;
 - учет снижения производительности карьерных автосамосвалов в зависимости от состояния проезжей части через влияние ограничения скорости.
3. Установлена закономерность влияния ограничений, связанных с взаимовлиянием автосамосвалов на ритмичность движения по автодорогам: при увеличении количества работающих в карьере автосамосвалов в условиях высоких грузопотоков и стесненной рабочей зоны с единственным капитальным съездом в нижней части производительность парка карьерных автосамосвалов растет с убывающей интенсивностью, а производительность среднесписочного автосамосвала снижается.
4. Установлено влияние дорожных факторов на производительность карьерных автосамосвалов, описываемое следующим образом:
 - ухудшенное состояние автодорог влечет снижение мгновенной скорости автосамосвалов вплоть до 8–10 км/ч в зависимости от количества и глубины неровностей или распутицы и снижения коэффициента сцепления; при этом снижение мгновенной скорости на участках в 2–4 раза влечет уменьшение среднеэксплуатационной скорости по маршруту и производительности автосамосвалов в 1,5–2 раза;

- работа дорожной техники, обеспечивающей поддержание состояния автодорог (защитка и выравнивание поверхности) в патрульном режиме, вызывает помехи для движения технологического автотранспорта, снижая их производительность в среднем на 2–4 %;
- ремонт участка дороги, по которому осуществляются перевозки, вызывает снижение производительности автосамосвалов на 6–20 %, причем тем больше, чем меньше дальность транспортирования; наименьшие потери достигаются при ремонте дороги короткими участками длиной до 50–70 м.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Яковлев В.Л. Исследование переходных процессов – новое направление в развитии методологии комплексного освоения георесурсов. – Екатеринбург: УрО РАН, 2019 – 284 с. URL: <https://igduran.ru/files/eshop/elibrary/2019-perh-process.pdf> (дата обращения 25.06.2023).
2. Журавлев А.Г. Вопросы оптимизации параметров транспортных систем карьеров // Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал). – 2020. – № 3-1. – С. 583–601. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/voprosy-optimizatsii-parametrov-transportnyh-sistem-karierov> (дата обращения 25.06.2023).
3. Васильев М.В., Яковлев В.Л. Научные основы проектирования карьерного транспорта. – М.: Наука, 1972. – 202 с.
4. Справочник. Открытые горные работы / Б.Г. Алешин, Ю.И. Анистратов, О.И. Благов, К.Е. Веницкий, Э.Л. Галустьян, Е.С. Гладченко, И.Г. Ищук, В.А. Каландаришвили, А.П. Красавин, Б.Н. Кутузов, В.В. Манкевич, Н.Н. Медников, Н.Н. Мельников, В.А. Мироненко, Ю.А. Норматов, Р.Ю. Подэрни, М.Г. Потапов, С.П. Решетняк, Н.П. Сеинов, А.И. Сухорученков, П.И. Томаков, К.Н. Трубецкой, И.А. Тынтеров, С.Е. Чирков, А.И. Шендеров, В.В. Школяренко. – М.: Горное бюро, 1994. – 590 с. URL: <https://www.geokniga.org/books/1747> (дата обращения 25.06.2023).
5. Raufovich U.S., Lola S. Theoretical studies of the influence of deep pit parameters on the choice of technological schemes for transporting rock mass // European Journal of Molecular & Clinical Medicine. – 2020. – V. 7. – № 2. – P. 709–713.
6. Лаптев Ю.В., Титов Р.С., Яковлев А.М. Математическая модель оптимизации производительности карьерного автомобильного транспорта // Известия высших учебных заведений. Горный журнал. – 2013. – № 4. – С. 126–135. URL: https://www.elibrary.ru/download/elibrary_19419383_81166360.pdf (дата обращения 25.06.2023).
7. Лемперт А.А., Павидис М.М., Жарков М.Л. Моделирование зарубежных сортировочных станций на основе теории массового обслуживания // Вестник Уральского государственного университета путей сообщения. – 2019. – Т. 3. – С. 43. URL: https://www.elibrary.ru/download/elibrary_41145374_52864205.pdf (дата обращения 25.06.2023).
8. Васильев М.В., Яковенко Б.В., Яковлев В.Л. Опыт планирования работы карьерного транспорта с использованием математических методов и вычислительной техники. – М.: Недра, 1966. – 52 с.
9. Teknomo K. Queuing rule of thumb based on M/M/s queuing theory with applications in construction management // Civil Engineering Dimension. – 2012. – V. 14. – № 3. – P. 139–146. URL: https://www.researchgate.net/publication/260945257_Queueing_Rule_of_Thumb_based_on_MMs_Queueing_Theory_with_Applications_in_Construction_Management (дата обращения 25.06.2023).
10. O'Neil T.J., Manula C.B. Computer simulation of materials handling in open pit mining. – Pennsylvania State Univ., 1966. – № SR-56. URL: <https://scholarsphere.psu.edu/resources/87886424-576c-4811-8069-d10e960d4a38> (дата обращения 25.06.2023).
11. Design of a digital 3D model of transport–technological environment of open-pit mines based on the common use of telemetric and geospatial information / I. Temkin, A. Myaskov, S. Deryabin, I. Konov // Sensors. – 2021. – V. 21. – № 18. – P. 6277. URL: https://www.researchgate.net/publication/354755349_Design_of_a_Digital_3D_Model_of_Transport-Technological_Environment_of_Open-Pit_Mines_Based_on_the_Common_Use_of_Telemetric_and_Geospatial_Information (дата обращения 25.06.2023).
12. Воронов А.Ю. Оптимизация показателей эксплуатационной производительности экскаваторно-автомобильных комплексов разрезов: автореф. дис. ... канд. техн. наук. – Кемерово, 2015. – 19 с. URL: <https://viewer.rsl.ru/ru/rsl01005565135?page=1&rotate=0&theme=white> (дата обращения 25.06.2023).
13. Журавлев А.Г., Скороходов А.В. К вопросу обоснования производительности экскаваторно-автомобильных комплексов методом компьютерного моделирования // Проблемы недропользования. – 2015. – № 2 (5). – С. 53–60. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/k-voprosu-obosnovaniya-proizvoditelnosti-ekskavatorno-avtomobilnyh-kompleksov-metodom-kompyuternogo-modelirovaniya> (дата обращения 25.06.2023).
14. Cheban A.Y., Khrunina N.P. Intensification of open mining operations with a small distance of transportation of rock mass // International Journal of Engineering Research in Africa. – 2018. – V. 38. – P. 100–114. URL: https://www.researchgate.net/publication/327397949_Intensification_of_Open_Mining_Operations_with_a_Small_Distance_of_Transportation_of_Rock_Mass (дата обращения 25.06.2023).
15. Управление транспортными потоками медного месторождения с использованием имитационного моделирования на основе программы АРЕНА / И.Ю. Ефимова, Е.Н. Гусева, Т.Н. Варфоломеева, С.А. Повитухин // Фундаментальные исследования. – 2019. – № 3. – С. 35–40. URL: <https://fundamental-research.ru/ru/article/view?id=42422> (дата обращения 25.06.2023).
16. Стенин Ю.В., Стариков А.И. Имитационное моделирование работы экскаваторно-автомобильных комплексов карьеров // Известия Уральского государственного горного университета. – 1998. – № 7. – С. 188–190. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/imitatsionnoe-modelirovanie-raboty-ekskavatorno-avtomobilnyh-kompleksov-karierov> (дата обращения 25.06.2023).
17. Forsman B., Rönkvist E., Vagenas N. Truck dispatch computer simulation in Aitik open pit mine // International Journal of Surface Mining, Reclamation and Environment. – 1993. – V. 7. – № 3. – P. 117–120.

18. Nurić A., Nurić S. Numerical modeling of transport roads in open pit mines // *Journal of Sustainable Mining*. – 2019. – V. 18. – № 1. – P. 25–30. URL: https://www.researchgate.net/publication/331203929_Numerical_modeling_of_transport_roads_in_open_pit_mines (дата обращения 25.06.2023).
19. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ. 2012617844 Российская федерация. Транспортная система карьера (ТСК). 2012615505; заявл. 03.07.12; опубл. 30.08.12.
20. Журавлев А.Г., Ченцов П.А. Возможности автоматизированной оптимизации работы транспортных систем карьеров на основе мультиагентного подхода // *Горный информационно-аналитический бюллетень*. – 2019. – № 11 (СЦ 37). – С. 141–150. DOI: 10.25018/0236-1493-2019-11-37-141-150. URL: https://doc365.ru/uploads/store/5fbbc118152bc9.44566395_gmonerpilfkjqh.pdf (дата обращения 25.06.2023).
21. Карьерный автотранспорт. Состояние и перспективы / П.Л. Мариев, А.А. Кулешов, А.Н. Егоров, И.В. Зырянов. – СПб.: Наука, 2004. – 429 с.

REFERENCES

1. Yakovlev V.L. *Issledovanie perekhodnykh protsessov – novoe napravlenie v razvitii metodologii kompleksnogo osvoeniya georesursov* [The study of transients is a new direction in the development of the methodology of integrated development of geo-resources]. Yekaterinburg, UB RAS Publ. house, 2019. 284 p.
2. Zhuravlev A.G. Issues of optimization of parameters of transport systems of quarries. *Mining information and analytical bulletin (scientific and technical journal)*, 2020, no. 3-1, pp. 583–601. In Rus. Available at: <https://cyberleninka.ru/article/n/voprosy-optimizatsii-parametrov-transportnyh-sistem-karierov> (accessed 25 June 2023).
3. Vasiliev M.V., Yakovlev V. L. *Nauchnye osnovy proektirovaniya karyernogo transporta* [Scientific foundations of the design of quarry transport]. Moscow, Nauka Publ., 1972. 202 p.
4. Trubetskoy K.N. *Spravochnik. Otkrytye gornye raboty* [Open-pit mining]. Moscow, Gornoe Byuro Publ., 1994. 590 p. Available at: <https://www.geokniga.org/books/1747> (accessed 25 June 2023).
5. Raufovich U.S., Lola S. Theoretical studies of the influence of deep pit parameters on the choice of technological schemes for transporting rock mass. *European Journal of Molecular & Clinical Medicine*, 2020, vol. 7, no. 2, pp. 709–713.
6. Laptsev Yu.V., Titov R.S., Yakovlev A.M. Mathematical model optimizing the performance of career road transport. News of higher educational institutions. *Mining Magazine*, 2013, no. 4, pp. 126–135. In Rus. Available at: https://www.elibrary.ru/download/elibrary_19419383_81166360.pdf (accessed 25 June 2023).
7. Lempert A.A., Pavidis M.M., Zharkov M.L. Modeling of foreign marshalling yards based on the theory of queuing. *Bulletin of the Ural State University of Railways*, 2019, no. 3, vol. 3, pp. 43. In Rus. Available at: https://www.elibrary.ru/download/elibrary_41145374_52864205.pdf (accessed 25 June 2023).
8. Vasiliev M.V., Yakovenko B.V., Yakovlev V.L. *Opyt planirovaniya raboty karyernogo transporta s ispolzovaniem matematicheskikh metodov i vychislitel'noy tekhniki* [Experience in planning the work of quarry transport using mathematical methods and computer technology]. Moscow, Nedra Publ., 1966. 52 p.
9. Teknomo K. Queuing rule of thumb based on M/M/s queuing theory with applications in construction management. *Civil Engineering Dimension*, 2012, vol. 14, no. 3, pp. 139–146. Available at: https://www.researchgate.net/publication/260945257_Queueing_Rule_of_Thumb_based_on_MMs_Queueing_Theory_with_Applications_in_Construction_Management (accessed 25 June 2023).
10. O'Neil T.J., Manula C.B. *Computer simulation of materials handling in open pit mining*. – Pennsylvania State Univ., 1966. no. SR-56. Available at: <https://scholarsphere.psu.edu/resources/87886424-576c-4811-8069-d10e960d4a38> (accessed 25 June 2023).
11. Temkin I., Myaskov A., Deryabin S., Konov I. Design of a digital 3D model of transport–technological environment of open-pit mines based on the common use of telemetric and geospatial information. *Sensors*, 2021, vol. 21, no. 18, pp. 6277. Available at: https://www.researchgate.net/publication/354755349_Design_of_a_Digital_3D_Model_of_Transport-Technological_Environment_of_Open-Pit_Mines_Based_on_the_Common_Use_of_Telemetric_and_Geospatial_Information (accessed 25 June 2023).
12. Voronov Art.Yu. *Optimizatsiya pokazateley ekspluatatsionnoy proizvoditelnosti ekskavatorno-avtomobilnykh kompleksov razrezov*. Dis. Kand. nauk [Optimization of operational performance indicators of excavator-automobile complexes of coal open pit. Cand. Dis.]. Kemerovo, 2021. 19 p.
13. Zhuravlev A.G., Skorokhodov A.V. On the issue of substantiating the productivity of excavator-automobile complexes by computer modeling. *Problems of subsurface use*, 2015, no. 2 (5), pp. 53–60. In Rus. Available at: <https://cyberleninka.ru/article/n/k-voprosu-obosnovaniya-proizvoditelnosti-ekskavatorno-avtomobilnyh-kompleksov-metodom-kompyuternogo-modelirovaniya> (accessed 25 June 2023).
14. Cheban A.Y., Khrunina N.P. Intensification of open mining operations with a small distance of transportation of rock mass. *International Journal of Engineering Research in Africa*, 2018, vol. 38, pp. 100–114. Available at: https://www.researchgate.net/publication/327397949_Intensification_of_Open_Mining_Operations_with_a_Small_Distance_of_Transportation_of_Rock_Mass (accessed 25 June 2023).
15. Efimova I.Yu. Guseva E.N., Varfolomeeva T.N., Povitukhin S.A. Management of transport flows of a copper deposit using simulation modeling based on the ARENA program. *Fundamental Research*, 2019, no. 3, pp. 35–40. In Rus. Available at: <https://fundamental-research.ru/ru/article/view?id=42422> (accessed 25 June 2023).
16. Stenin Yu.V., Starikov A.I. Simulation modeling of excavator-automobile complexes of quarries. *News of the Ural State Mining University*, 1998, no. 7, pp. 188–190. In Rus. Available at: <https://cyberleninka.ru/article/n/imitatsionnoe-modelirovanie-raboty-ekskavatorno-avtomobilnyh-kompleksov-karierov> (accessed 25 June 2023).
17. Forsman B., Rönnkvist E., Vagenas N. Truck dispatch computer simulation in Aitik open pit mine. *International Journal of Surface Mining, Reclamation and Environment*, 1993, vol. 7, no. 3, pp. 117–120.

18. Nurić A., Nurić S. Numerical modeling of transport roads in open pit mines. *Journal of Sustainable Mining*, 2019, vol. 18, no. 1, pp. 25–30. Available at: https://www.researchgate.net/publication/331203929_Numerical_modeling_of_transport_roads_in_open_pit_mines (accessed 25 June 2023).
19. Bakhturin Yu.A., Zhuravlev A.G., Trofimenko L.A. *Transportnaya Sistema karyera* (TSK) [The quarry transport system (TSK)]. Patent RF, no. 2012617844, 2012.
20. Zhuravlev A.G., Chentsov P.A. Possibilities of automated optimization of quarry transport systems based on a multi-agent approach. *Mining Information and Analytical bulletin*, 2019, no. 11 (SC 37), pp. 141–150. DOI: 10.25018/0236-1493-2019-11-37-141-150. In Rus. Available at: https://doc365.ru/uploads/store/5fbbc118152bc9.44566395_gmonepilfkjqh.pdf (accessed 25 June 2023).
21. Mariev P.L., Kuleshov A.A., Egorov A.N., Zyryanov I.V. *Karyerny avtotransport* [Open pit transport]. St. Petersburg, Nauka Publ., 2004. 429 p.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Артём Геннадиевич Журавлев, кандидат технических наук, заведующий лабораторией транспортных систем карьеров и геотехники Института горного дела Уральского отделения Российской академии наук, Россия, 620219, г. Екатеринбург, ул. Мамина-Сибиряка, 58. juravlev@igduran.ru; <http://orcid.org/0000-0001-7643-3994>

Владимир Владимирович Черных, младший научный сотрудник лаборатории транспортных систем карьеров и геотехники Института горного дела Уральского отделения Российской академии наук, Россия, 620219, г. Екатеринбург, ул. Мамина-Сибиряка, 58. chernyh@igduran.ru; <http://orcid.org/0000-0002-1805-351X>

Поступила в редакцию: 27.06.2023

Поступила после рецензирования: 25.10.2023

Принята к публикации: 26.10.2023

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Artem G. Zhuravlev, Cand. Sc., Head of the Laboratory of Quarry Transport Systems and Geotechnics, Institute of Mining of the Ural Branch of the Russian Academy of Sciences, 58, Mamin-Sibiriyak street, Yekaterinburg, 620219, Russian Federation. juravlev@igduran.ru; <http://orcid.org/0000-0001-7643-3994>

Vladimir V. Chernykh, Junior Researcher, Institute of Mining of the Ural Branch of the Russian Academy of Sciences, 58, Mamin-Sibiriyak street, Yekaterinburg, 620219, Russian Federation. chernyh@igduran.ru; <http://orcid.org/0000-0002-1805-351X>

Received: 27.06.2023

Revised: 25.10.2023

Accepted: 26.10.2023