ГИАБ. Горный информационно-аналитический бюллетень /
MIAB. Mining Informational and Analytical Bulletin, 2025;(10):112-123
ОРИГИНАЛЬНАЯ СТАТЬЯ / ORIGINAL PAPER

УДК 622.68:004.94 DOI: 10.25018/0236_1493_2025_10_0_112

РАЦИОНАЛЬНЫЕ ПАРАМЕТРЫ ВНУТРИКАРЬЕРНОГО АВТОТРАНСПОРТА ПРИ ИМИТАЦИОННОМ МОДЕЛИРОВАНИИ С ЧАСТНОЙ ОПТИМИЗАЦИЕЙ ПО ВТОРОСТЕПЕННЫМ ФАКТОРАМ

А.Г. Журавлев[1], И.А. Глебов[1]

[1] Институт горного дела Уральского отделения РАН,
Екатеринбург, Россия, e-mail: i.glebov@igduran.ru

Аннотация: Расходы на транспортирование горной массы составляют до половины и более от общих затрат на добычу руды, и с углублением карьера их доля постоянно растет. В связи с этим актуальна оптимизация технологического транспорта в горнотехнической системе с учетом ее развития. Большинство процессов формирования транспортных систем карьеров не поддаются традиционным методам оптимизации, таким как поиск минимума и максимума ключевых показателей. Поэтому необходимо использовать комбинированный подход. Часто возникают задачи оптимизации тех или иных главных параметров с учетом второстепенных факторов, при этом необходимо обеспечить невысокую трудоемкость дополнительных расчетов. Цель исследования заключается в решении задачи частной оптимизации параметра транспортной системы карьера, определенного по основному фактору, в приложении к второстепенному фактору на примере обоснования количества работающего в сборочном звене автотранспорта при циклично-поточной технологии. Задача решена на примере сборочного звена транспорта карьера Михайловского ГОКа. Предложен следующий методический подход к частной оптимизации: диапазон рациональных значений количества работающих в карьере автосамосвалов на вывозке горной массы из забоев до перегрузочных пунктов на дробильно-конвейерные комплексы определяется методом вариантов при имитационном компьютерном моделировании по критерию обеспечения заданной часовой и сменной производительности; рациональные значения количества самосвалов уточняются с учетом экономического показателя потенциальных убытков от недозагрузки дробильно-конвейерных комплексов. Установлено, что для рассмотренных условий работы рациональное количество работающих автосамосвалов грузоподъемностью 240 т составляет 28–29 ед.

Ключевые слова: имитационное компьютерное моделирование, транспортная система карьера, производительность карьерного автотранспорта, дробильно-конвейерный комплекс, дробильно-перегрузочная установка, экскаваторно-автомобильный комплекс, карьерный автосамосвал, горнотранспортное оборудование.

Благодарность: Исследования выполнены в рамках государственного задания № 075-00410-25-00. № гос. рег. 125070908257-0. Тема 1 (2025–2027). Методология обоснования перспектив технологического развития комплексного освоения минерально-сырьевых ресурсов твердых полезных ископаемых России (FUWE-2025-0001).

Для цитирования: *Журавлев А. Г., Глебов И. А.* Рациональные параметры внутрикарьерного автотранспорта при имитационном моделировании с частной оптимизацией по второстепенным факторам // Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2025. – № 10. – С. 112–123. DOI: 10.25018/0236_1493_2025_10_0_112.

Rational number of in-pit dump trucks in simulation modeling with partial optimization by secondary factors

A.G. Zhuravlev[1], I.A. Glebov[1]

[1] Institute of Mining of the Ural Branch Russian Academy of Sciences, Ekaterinburg, Russia, e-mail: i.glebov@igduran.ru

Abstract: Haulage costs reach more than a half of total cost of ore mining, and increase as an open pit mine grows deeper. This actualizes optimization of transportation within a geotechnical system of an open pit mine with regard to its development. Most of the processes involved in the formation of transport systems in open pit mines are impossible to optimize using conventional methods such as finding minimum and maximum, or values of key factors. So, a mixed-type approach is required. It is often necessary to optimize major factors with regard to some minor factors while decreasing the burden of extra calculation. This study solves the problem of partial optimization of a main factor of an open-pit transport system in terms of a minor factor in terms of a substantiation of a number of dump trucks in a cyclical-and-continuous technology. The problem is solved as a case-study of the transport system of Mikhailovsky GOK. The proposed approach to the partial optimization involves the following stages: the range of a rational number of dump trucks which transport rocks from working faces to the points of reloading to crushing and conveying systems is determined by the method of search during computer simulation using the criterion of the hourly and shift capacity; the rational number of dump trucks is adjusted with regard to the economic indicator of potential losses because of the underuse of the crushing and conveying systems. The case-study of the conditions addressed finds out that the rational number of dump trucks with the capacity of 240 t is 28–29 machines.

Key words: computer simulation, open-pit transport system, capacity of dump trucks, crushing and conveying system, crushing and reloading system, truck-and-shovel system, open-pit dump truck, mining and transport equipment.

Acknowledgements: The study was carried out under State Contract No. 075-00410-25-00, State Registration No. 125070908257-0. Topic 1 (2025–2027): Prospect Validation Methodology for Technological Development in Integrated Solid Mineral Mining in Russia, FUWE-2025-0001.

For citation: Zhuravlev A. G., Glebov I. A. Rational number of in-pit dump trucks in simulation modeling with partial optimization by secondary factors. *MIAB. Mining Inf. Anal. Bull.* 2025;(10):112-123. [In Russ]. DOI: 10.25018/0236_1493_2025_10_0_112.

Введение

Оптимизация процесса добычи открытым способом глубокозалегающих полезных ископаемых не только способствует улучшению технико-экономических показателей предприятий, но и позволяет более эффективно использовать геологические ресурсы. Это достигается за счет снижения себестоимости добычи и возможности перенаправить сэ-

кономленные средства на расширение и углубление карьера.

Себестоимость транспортирования составляет 40 — 50% и более от общих затрат на добычу полезного ископаемого открытым способом и с увеличением глубины карьера неуклонно увеличивается [1]. В связи с этим проблема комплексной оптимизации технологического транспорта как части горнотехнической системы, учитывающей переходные процессы ее развития, является актуальной [2, 3].

В научно-технической литературе даются разные подходы к расчету и выбору рационального парка карьерных автосамосвалов, применяемых как в качестве сборочного [4], так и в качестве сборочно-магистрального транспорта [5, 6]. Как правило, это требует трудоемкого комплексного рассмотрения [7], либо связано с техническими и технологическими соображениями [8], либо с обобщенными технико-экономическими показателями (например, полные затраты, дисконтированные затраты, стоимость владения), предполагающими детальную калькуляцию. Однако на практике возникает необходимость наряду с поиском рациональных параметров транспорта по основному фактору определить их в сочетании с дополнительными (второстепенными) факторами [9].

При этом для оптимизации по второстепенному(-ым) фактору(-ам) предпочтительно иметь нетрудоемкий расчет.

Многие процессы при формировании транспортных систем карьеров не могут быть оптимизированы классическим способом поиска минимума и максимума ключевых показателей. Требуется применение комбинированного подхода.

Цель данного исследования — решение задачи частной оптимизации параметра транспортной системы карьера, определенного по основному фактору, в приложении к второстепенному фактору на примере обоснования количества работающего в сборочном звене автотранспорта при циклично-поточной технологии.

Методы исследования

Задача решается на примере определения количества автосамосвалов, работающих на перевозке горной массы в карьере Михайловского ГОКа. Рассмотрен сборочный автомобильный транспорт в составе циклично-поточной технологии (ЦПТ), доставляющий руду из забоев к дробильно-перегрузочным установкам (ДПУ) [10] дробильно-конвейерных комплексов (ДКК) ДКК-1 и ДКК-2. Доставка руды и вскрыши автотранспортом из забоев к перегрузочным пунктам железнодорожного транспорта не рассматривается.

Для определения необходимого количества автосамосвалов используется имитационное моделирование [11, 12] работы автотранспорта в связке с приемными бункерами дробильно-конвейерных комплексов. Это позволяет учесть совокупность факторов организации работы автосамосвалов в местах погрузки, разгрузки и сети карьерных автодорог, в том числе потери времени на разминовках, снижении скорости на подъемах, спусках, крутых поворотах, временных проездах забоев и т.п. Имитационное моделирование выполнено в программном обеспечении «Транспортная система карьера» (ПО «ТСК»), разработанном в ИГД УрО РАН [13] (рис. 1).

Задача решалась с привязкой к максимальной часовой производительности с допустимым диапазоном ее снижения до среднесуточных значений, определяемых через годовую производительность двух комплексов: для ДКК-1 — 15 млн т/ /год при паспортной часовой производительности 3000 т/ч, для ДКК-2 — 35 млн т/год при часовой производительности 7200 т/ч [14]. Учитывая, что

оба дробильно-конвейерных комплекса имеют достаточно простую линейную структуру, их работа не детализировалась при имитационном моделировании работы автотранспорта для упрощения модели. Адекватность имитации взаимодействия автотранспорта с ДКК обеспечена путем учета количества мест разгрузки, времени обмена самосвалов на разгрузочных местах, среднего времени разгрузки автосамосвалов в бункеры ДПУ с учетом их вместимости, производительности дробилки и выгрузки руды на магистральные конвейеры. Указанные параметры приняты по результатам моделирования в отдельном программном обеспечении «Дробильно-конвейерный комплекс» (ПО «ДКК»), разработанном в ИГД УрО РАН. Исходными данными для моделирования в ПО «ДКК» являлись технические параметры ДПУ-7200 производства ПАО «Уралмашзавод», в разработке которой принимали участие специалисты ИГД УрО РАН [14], и результаты хронометражных наблюдений работы ДПУ-7200 на Михайловском ГОКе.

Рассмотрен случай транспортирования руды с нижних горизонтов карьера при уходе горных работ на глубину относительно существующего положения. Расстояние транспортирования составит 6 — 10,5 км.

Перебором вариантов количества работающих в карьере автосамосвалов грузоподъемностью 240 т за счет моделирования определяется объем руды, отгруженной автотранспортом в приемные

ДПУ-1, ДПУ-2 – дробильно-перегрузочные установки 1 и 2 соответственно;
ЛК – ленточный конвейер (3 ед.); ПСР – площадка складирования руды; КНК – крутонаклонный конвейер

Рис. 1. Окно программы «Транспортная система карьера» при моделировании автомобильно-конвейерного комплекса на примере Михайловского ГОКа

Fig. 1. The window of the program "Quarry transport system" when modeling an automobile conveyor complex using the example of the Mikhailovsky GOK

бункеры ДКК за сутки, и выбирается то их количество, которое обеспечивает заданную производительность в диапазоне от среднесуточной до паспортной часовой. Эти значения считаются рациональными, определенными по главному фактору — производительность.

Далее выполнялась частная оптимизация количества автосамосвалов по технико-экономическим показателям работы оборудования ЦПТ [15, 16].

В качестве критерия принят минимум суммарных затрат на транспортирование горной массы автосамосвалами и дробильно-конвейерным комплексом с учетом потенциальных убытков от недозагрузки дробильно-конвейерных комплексов [17].

При этом оптимизированное количество автосамосвалов не может быть меньше того, которое обеспечивает минимально допустимую производительность.

Затраты на транспортирование рассчитаны по укрупненным технико-экономическим показателям базового объекта Михайловского ГОКа. Потенциальные убытки от недозагрузки ДКК определялись по трем вариантам, указанным в таблице. Значения стоимостных показателей приняты по некоторым данным из научно-технической литературы и открытых источников информации [18, 19].

Математические модели для имитационного моделирования автомобильного транспорта сформированы на основе полученных ранее в ходе экспериментальных исследований опытных данных [20].

Исходные данные для моделирования функционирования дробильно-конвейерного комплекса сформированы на основе данных о параметрах имеющегося ДКК-1 с крутонаклонным конвейером на карьере Михайловского ГОКа, а также о строящемся ДКК-2 на том же

Варианты определения потенциальных убытков от недозагрузки дробильно-конвейерного комплекса
Options for determining potential losses from underloading of crushing and conveyor complex

Источник убытков	Показатель	Значение	Преимущества и недостатки
Вариант 1. Простой оборудования ДКК пропорционально его высокой стоимости	среднечасовая амортизация	1,5 млн руб./ч	Преимущества: - простота расчета; - относительная обоснованность в привязке к конкретному объекту горных работ. Недостатки: - неявная взаимосвязь с фактическими показателями работы обогатительной фабрики и убытками.
Вариант 2. Убытки от простоя части мощностей дробильно-обогатительной фабрики, рассчитываемые с учетом конкретных рисков при уменьшении рудопотока от ДКК-1 и ДКК-2 с учетом технологической схемы ДОФ	упущенная выгода от снижения объема производства готовой продукции	оптимум*: 4 млн руб./ч	Преимущества: - более точный показатель благодаря учету схемы конкретного обогатительного производства; - имеется связь показателя с объемом производства. Недостатки: - требует наличия схемы обогатительного производства; - более трудоемкий расчет.
		максимум: 5 млн руб./ч	

* Вариант 2 Оптимум в описываемых расчетах принят как наиболее реалистичный.

карьере с ленточным конвейером с углом наклона 16° [14].

Моделирование выполнено в расчете на одновременную работу обоих вышеуказанных комплексов ДКК. Распределение автосамовалов по маршрутам осуществляется по следующим принципам:

- выбор ближайшей к забою ДПУ;
- учет интенсивности поступления автосамосвалов на разные ДПУ и их перераспределение на другую ДПУ, если на планируемой имеется риск образования очереди самосвалов, ожидающих разгрузки.

Результаты и их анализ

Установлена закономерность изменения ряда показателей производительности автотранспортного звена транспорта от количества работающих автосамосвалов. Так, из рис. 2 видно, что по мере увеличения их количества суммарная производительность всех машин интенсивно возрастает, а при приближении к суммарной номинальной часовой производительности ДПУ-1 и ДПУ-2 (10 200 т/ч) график искривляется. Наблюдается существенное отклонение от простого пропорционального расчета производительности через количество автосамосвалов (показано на рис. 2 штрихпунктирной линией). Оно объясняется усложнением разминовки автосамосвалов на путях подъезда к ДПУ, влиянием процессов обмена самосвалов на разгрузочных местах ДПУ по мере снижения интервала между разгрузками самосвалов (в частности, образуются небольшие очереди автосамосвалов, ожидающих разгрузки). Следовательно, имитационное компьютерное моделирование позволяет учесть нелинейность зависимостей и определять рабочий парк транспортных машин для карьера более обоснованно, не допуская как недостаточного их количества, так и завышения, приводящего к пере-

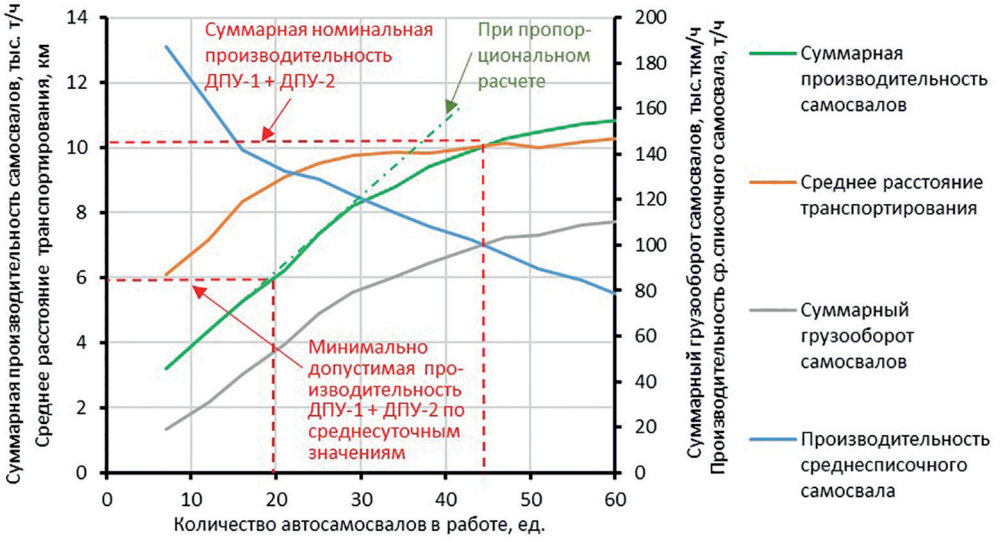

Рис. 2. Влияние количества работающих автосамосвалов на показатели их производительности для условий моделирования карьера Михайловского ГОКа (приняты автосамосвалы грузоподъемностью 240 т)

Fig. 2. The influence of the number of working dump trucks on their performance indicators for the conditions of modeling the Mikhailovsky GOK quarry (dump trucks with a lifting capacity of 240 tons were adopted)

расходу в натуральных и стоимостных показателях.

Также по мере роста парка нелинейно возрастает среднее расстояние транспортирования автосамосвалами (см. рис. 2). Это объясняется улучшением возможности распределения самосвалов между ДПУ, что ведет к росту числа машин, которые доставляют руду к ДПУ-2, имеющей более высокую производительность, но более удаленной от забоев. При количестве самосвалов более 28 — 30 ед. распределение их между ДПУ практически пропорционально производительности ДКК-1 и ДКК-2 и далее почти не изменяется, поэтому и среднее расстояние стабилизируется.

Производительность среднесписочного автосамосвала по мере увеличения их количества снижается. Это связано как с ростом среднего расстояния транспортирования, так и с усложнением обмена автосамосвалов в пунктах погрузки и разгрузки.

Из рис. 2 видно, что с учетом всего комплекса вышеописанных закономерностей рабочий парк автосамосвалов может быть выбран в диапазоне 20 — 45 ед. Очевидно, что диапазон очень широк и необходимо учесть дополнительные факторы для конкретизации его рационального значения.

Из числа дополнительных факторов важнейшее значение имеют производительность всего автомобильно-конвейерного транспорта и показатели стабильности рудопотока на обогатительную фабрику. Хотя предпочтительным для стабильного грузопотока является использование большего количества автосамосвалов, это ведет к росту затрат. Поэтому данная задача должна решаться с учетом как рисков, возникающих для стабильности работы обогатительного производства, так и дополнительных затрат для внутрикарьерного транспорта.

Конечно, в общем случае она может быть решена путем учета всех факторов в полной себестоимости добычи. Однако на стадии частной оптимизации транспортной системы это не всегда целесообразно ввиду усложнения расчетов. Поэтому предлагается использовать подход с учетом частного показателя, оценивающего потенциальные финансовые потери (убытки) от снижения рудопотока, приведенные к точке выхода автомобильно-конвейерного транспорта из карьера (рудный склад или пункт перегрузки). Принятые виды и значения этого показателя приведены в таблице. Наиболее показательным является вариант 2 — убытки от простоя части мощ-

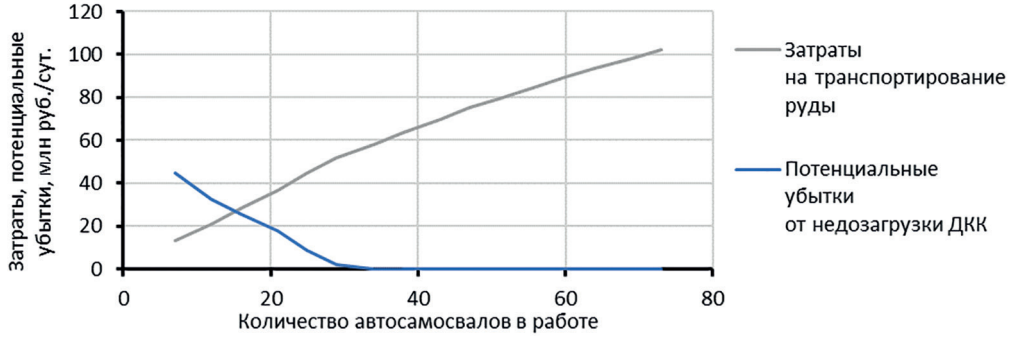

Рис. 3. Расчетные эксплуатационные затраты на перевозку руды автомобильно-конвейерным транспортом и потенциальные убытки от недозагрузки дробильно-конвейерного комплекса

Fig. 3. Estimated operating costs for ore transportation by motor conveyor transport and potential losses from underloading of crushing and conveyor complex

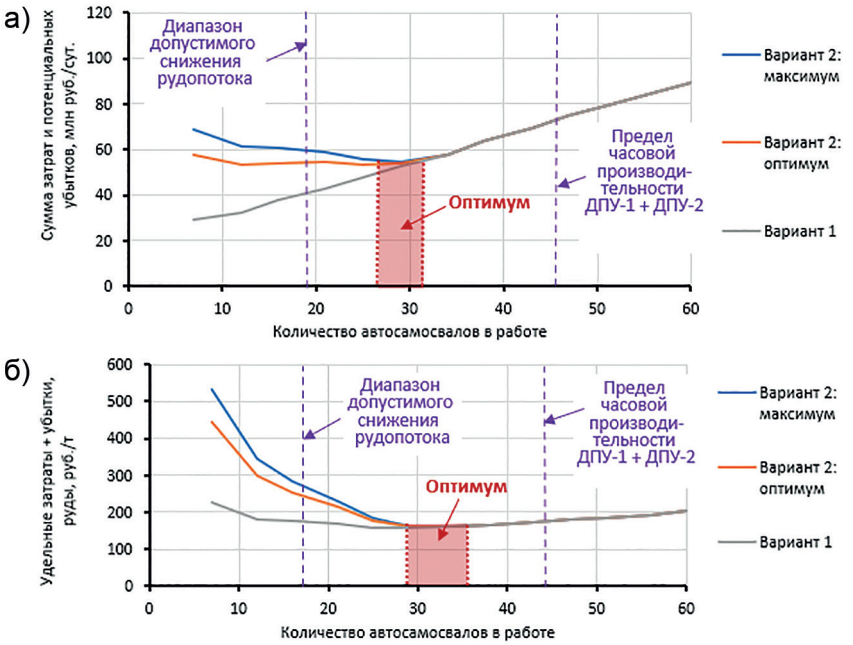

Рис. 4. Сумма затрат на транспортирование руды и финансовых потерь от снижения объема грузопотока в зависимости от количества работающих в карьере автосамосвалов: по абсолютной величине (а); удельные значения на тонну перевезенной руды (б)

Fig. 4. The amount of ore transportation costs and financial losses from a decrease in freight traffic, depending on the number of dump trucks operating in the quarry: by absolute value (a); specific values per ton of transported ore (b)

ностей дробильно-обогатительной фабрики.

Из рис. 3 видно, что по мере роста количества самосвалов, перевозящих руду из забоев к ДПУ, потенциальные убытки снижаются, но растут затраты на сам транспорт (в основном, за счет автотранспорта). Номинальным грузопотоком принята сумма производительностей ДКК-1 и ДКК2, равная 210 тыс. т/сут. (номинальная годовая производительность двух комплексов 50 млн т/год при соответствующих плановых коэффициентах использования, принятых на Михайловском ГОКе). При ее достижении потенциальные потери считаются равными нулю, а при меньшей выработке транспорта — они возрастают по мере роста простоев ДКК. Фактическая производительность транспорта определяется по результатам моделирования (см. рис. 2) в зависимости от количества работающих автосамосвалов в пределах номинальной производительности ДКК-1 и ДКК-2, равной 10 200 т/ч.

Сводные показатели даны на рис. 4. Видно, что:

- при относительно невысоком влиянии рассматриваемого грузопотока на стабильность работы обогатительной фабрики и/или незначительных потерях от этого сумма затрат и убытков монотонно возрастает с ростом количества работающих автосамосвалов, и поэтому рациональным значением рабочего парка будет то, которое соответствует минимально допустимой производительности (рис. 4, *а*);
- при высоких значениях потенциальных убытков от нестабильности грузопотока наблюдается минимум суммы затрат и убытков, что позволяет опре-

делить рациональное количество автосамосвалов по минимуму данной функции (см. рис. 4, *а*).

Отметим, что в дополнение к абсолютному значению суммы затрат и убытков необходимо оценивать их удельные значения на 1 т перевезенной руды, что позволяет за счет сопоставления диапазона минимальных значений затрат более точно определить рациональный рабочий парк. Так, в приведенном примере по абсолютному значению (см. рис. 4, *а*) рациональное количество работающих самосвалов составляет 27—32, а по удельному значению — 28—35 (рис. 4, *б*). Следовательно, рациональным будет парк 28—30 самосвалов. Конкретное значение выбирается с учетом дополнительных технических и технологических факторов: надежность конкретной марки применяемых автосамосвалов, коэффициент неравномерности работы экскаваторов в забоях и соответствующая неравномерность потока автосамосвалов в целом и т.п.

Выводы

1. Показано, что имитационное моделирование обеспечивает более точное определение рабочего парка карьерного автотранспорта. Учитывая характер зависимости для транспортной системы со сложной технологической схемой, использование для этих целей простых расчетных методик дает в ряде случаев существенную погрешность, которая в полной мере не компенсируется дополнительными коэффициентами либо приводит к неоправданно завышенному рабочему парку и соответствующим затратам.

2. В общем случае при определении рациональных параметров отдельных элементов транспортной системы карьера при отсутствии необходимости расчета сводных технико-экономических показателей по карьеру в целом целесообразно применять двухстадийный методический подход с частной оптимизацией:

1) по результатам имитационного моделирования определяются зависимости технологических показателей работы карьерного транспорта от количества автосамосвалов в карьере (в данном случае, а могут учитывать и другие варьируемые параметры, например, грузоподъемность автосамосвалов и др.); учитывается работа не только сборочного, но и магистрального транспорта (ДКК);

2) обосновывается и вычисляется критериальный показатель, определяющий приведенные финансовые потери (убытки) от недозагрузки потребителя руды, поставляемой из карьера; как правило, это потенциальные убытки от потери производительности (или простоя) дробильно-обогатительной фабрики;

3) вышеуказанный критериальный показатель транслируется на точку выхода рассматриваемого грузопотока из карьера с учетом риска, который несет падение данного грузопотока в общей технологической схеме транспорта;

4) рассчитывается зависимость финансовых потерь от рассматриваемого параметра (в данном случае — количества работающих в карьере автосамосвалов), при необходимости такой расчет выполняется по вариантам риска (например, оптимистичный, пессимистичный и реалистичный);

5) рассчитываются общие затраты как сумма себестоимости перевозок комбинированным транспортом и финансовых потерь; определяются удельные значения затрат в расчете на 1 перевозимую тонну руды;

6) по кривой общих затрат выбирается рациональное значение рабочего парка автосамосвалов в зависимости от характера:

- как математический минимум кривой в заданном допустимом диапазоне

отклонения производительности транспорта от номинальной, если полученная кривая имеет минимум;

• как наименьшее значение кривой в допустимом диапазоне отклонения производительности транспорта от номинальной, если кривая не имеет минимума.

3. Установлены закономерности изменения производительности автомобильного звена транспорта в конкретных горнотехнических условиях карьера на примере Михайловского ГОКа. Моделированием и расчетами подтверждена применимость разработанного методического подхода при определении рабочего парка автосамосвалов применительно к доставке руды от забоев к перегрузочным пунктам дробильно-конвейерных комплексов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Яковлев В. Л.* Теория и практика выбора транспорта глубоких карьеров. — Новосибирск: Наука, 1989. — 240 с.

2. *Matsimbe J.* Optimization of shovel-truck productivity in quarries // International Journal of Research in Advent Technology. 2020, vol. 8, no. 10, pp. 1—9. DOI: 10.32622/ijrat.810202008.

3. *Яковлев В. Л.* Исследование переходных процессов — новое направление в развитии методологии комплексного освоения георесурсов. — Екатеринбург: УрО РАН, 2019. — 284 с.

4. *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. DOI: 10.9744/ced.14.3.139-146.

5. *O'Neil T. J.*, *Manula C. B.* Computer simulation of materials handling in open pit mining. Pennsylvania State Univ., 1966, 89 p.

6. *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.

7. *Temkin I., Myaskov A., Deryabin S., Konov I.* Sensors 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. 62—77. DOI: 10.3390/s21186277.

8. *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. — № 3(43). — С. 24—32. DOI: 10.20291/2079-0392-2019-3-24-32.

9. *Shamsi M., Pourrahimian Y., Rahmanpour M.* Optimisation of openpit mine production scheduling considering optimum transportation system between truck haulage and semi-mobile in-pit crushing and conveying // International Journal of Mining, Reclamation and Environment. 2022, vol. 36, no. 2, pp. 142—158.

10. *Bernardi L., Kumral M., Renaud M.* Comparison of fixed and mobile in-pit crushing and conveying and truck-shovel systems used in mineral industries through discrete-event simulation // Simulation Modeling Practice and Theory. 2020, vol. 103, pp. 102—100. DOI: 10.1016/j.simpat.2020.102100.

11. *Наговицын Г. О.* Оптимизация местоположения карьерных рудоспусков с использованием методов компьютерного моделирования // Горный информационно-аналитический бюллетень. — 2017. — № S23. — С. 203—213.

12. *Стенин Ю. В.*, *Стариков А. И.* Имитационное моделирование работы экскаваторно-автомобильных комплексов карьеров // Известия Уральского государственного горного университета. — 1998. — № 7. — С. 188—190.

13. *Журавлев А. Г.*, *Черепанов В. А.*, *Глебов И. А.* Методический подход к оптимизации параметров транспортной системы карьера в динамике развития горнотехнической системы // Известия Тульского государственного университета. Науки о Земле. — 2024. — № 4. — С. 232—247.

14. *Исмагилов Р. И.*, *Журавлев А. Г.*, *Фурин В. О.* Проектирование современных российских дробильно-перегрузочных установок для комплексов ЦПТ // Горная промышленность. — 2024. — № 3. — С. 104—111.

15. *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.

16. *Воронов А. Ю.* Оптимизация показателей эксплуатационной производительности экскаваторно-автомобильных комплексов разрезов: автореф. дис. ... канд. техн. наук. — Кемерово, 2015. — 19 с.

17. *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.

18. *Андреева Л. И.*, *Лашманов В. А.* Повышение уровня стандартизации ремонтных процессов на примере АО «Ковдорский ГОК» / Технологическое оборудование для горной и нефтегазовой промышленности: Сборник трудов XVI международной научно-технической конференции в рамках Уральской горонопромышленной декады. — Екатеринбург: УГГУ, 2018. — С. 342—345.

19. *Глебов А. В.* Определение значимости показателей при оценке уровня качества геотехники // Известия Тульского государственного университета. Науки о Земле. — 2021. — № 1. — С. 123—137.

20. *Журавлев А. Г.*, *Глебов И. А.*, *Черепанов В. А.* Поиск резервов повышения производительности экскаваторно-автомобильных комплексов с применением компьютерного моделирования // Горная промышленность. — 2023. — № 6. — С. 148—154. ГИАБ

REFERENCES

1. Yakovlev V. L. *Teoriya i praktika vybora transporta glubokikh kar'erov* [Theory and practice of choosing deep quarry transport], Novosibirsk, Nauka, 1989, 240 p.

2. Matsimbe J. Optimization of shovel-truck productivity in quarries. *International Journal of Research in Advent Technology*. 2020, vol. 8, no. 10, pp. 1—9. DOI: 10.32622/ijrat.810202008.

3. 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], Ekaterinburg, UrO RAN, 2019, 284 p.

4. 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. DOI: 10.9744/ced.14.3.139-146.

5. O'Neil T. J., Manula C. B. *Computer simulation of materials handling in open pit mining*. Pennsylvania State Univ., 1966, 89 p.

6. 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.

7. Temkin I., Myaskov A., Deryabin S., Konov I. Sensors 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. 62—77. DOI: 10.3390/s21186277.

8. Lempert A. A., Pavidis M. M., Zharkov M. L. Modeling foreign marshalling yards based on queuing theory. *Herald of the Ural state university of railway transport*. 2019, no. 3(43), pp. 24—32. [In Russ]. DOI: 10.20291/2079-0392-2019-3-24-32.

9. Shamsi M., Pourrahimian Y., Rahmanpour M. Optimisation of openpit mine production scheduling considering optimum transportation system between truck haulage and semi-mobile in-pit crushing and conveying. *International Journal of Mining, Reclamation and Environment*. 2022, vol. 36, no. 2, pp. 142—158.

10. Bernardi L., Kumral M., Renaud M. Comparison of fixed and mobile in-pit crushing and conveying and truck-shovel systems used in mineral industries through discrete-event simulation. *Simulation Modeling Practice and Theory*. 2020, vol. 103, pp. 102—100. DOI: 10.1016/j.simpat.2020.102100.

11. Nagovitsyn G. O. Optimization of the location of quarry ore deposits using computer modeling methods. *MIAB. Mining Inf. Anal. Bull.* 2017, no. S23, pp. 203—213. [In Russ].

12. Stenin Yu. V., Starikov A. I. Simulation modeling of the operation of excavator-automobile complexes of quarries. *News of the Ural State Mining University*. 1998, no. 7, pp. 188—190. [In Russ].

13. Zhuravlev A. G., Cherepanov V. A., Glebov I. A. A methodological approach to optimizing the parameters of the quarry transport system in the dynamics of mining system. *News of the Tula state university. Sciences of Earth*. 2024, no. 4, pp. 232 — 247. [In Russ].

14. Ismagilov R. I., Zhuravlev A. G., Furin V. O. Design of modern Russian crushing and reloading plants for CPT complexes. *Russian Mining Industry Journal*. 2024, no. 3, pp. 104 — 111. [In Russ].

15. Laptev Yu. V., Titov R. S., Yakovlev A. M. Mathematical model of optimizing the productivity of career motor transport. *Minerals and Mining Engineering*. 2013, no. 4, pp. 126 — 135. [In Russ].

16. Voronov A. Yu. *Optimizatsiya pokazateley ekspluatatsionnoy proizvoditel'nosti ekskavatorno-avtomobil'nykh kompleksov razrezov* [Optimization of performance indicators of excavator-automobile complexes of sections], Candidate's thesis, Kemerovo, 2015, 19 p.

17. Vasil'ev M. V., Yakovenko B. V., Yakovlev V. L. *Opyt planirovaniya raboty kar'ernogo transporta s ispol'zovaniem matematicheskikh metodov i vychislitel'noy tekhniki* [Experience in planning the operation of quarry transport using mathematical methods and computer technology], Moscow, Nedra, 1966, 52 p.

18. Andreeva L. I., Lashmanov V. A. Increasing the level of standardization of repair processes using the example of JSC Kovdorsky GOK. *Tekhnologicheskoe oborudovanie dlya gornoy i neftegazovoy promyshlennosti: Sbornik trudov XVI mezhdunarodnoy nauchno-tekhnicheskoy konferentsii v ramkakh Ural'skoy goronopromyshlennoy dekady* [Technological equipment for the mining and oil and gas industry. Proceedings of the XVI International Scientific and Technical Conference within the framework of the Ural Mining Decade], Ekaterinburg, UGGU, 2018, pp. 342 — 345. [In Russ].

19. Glebov A. V. Determining the importance of indicators in assessing the quality level of geotechnics. *News of the Tula state university. Sciences of Earth*. 2021, no. 1, pp. 123 — 137. [In Russ].

20. Zhuravlev A. G., Glebov I. A., Cherepanov V. A. Search for reserves to increase productivity of excavator-automobile complexes using computer modeling. *Russian Mining Industry Journal*. 2023, no. 6, pp. 148 — 154. [In Russ].

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Журавлев Артем Геннадиевич[1] — канд. техн. наук,
зав. лабораторией, e-mail: juravlev@igduran.ru,
ORCID ID: 0000-0001-7643-3994,
Глебов Игорь Андреевич[1] — научный сотрудник,
e-mail: i.glebov@igduran.ru,
ORCID ID: 0000-0003-4436-3594,
[1] Институт горного дела Уральского отделения РАН.
Для контактов: Глебов И.А., e-mail: i.glebov@igduran.ru.

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

A.G. Zhuravlev[1], Cand. Sci. (Eng.),
Head of Laboratory, e-mail: juravlev@igduran.ru,
ORCID ID: 0000-0001-7643-3994,
I.A. Glebov[1], Researcher, e-mail: i.glebov@igduran.ru,
ORCID ID: 0000-0003-4436-3594,
[1] Institute of Mining of Ural branch of the Russian Academy of Sciences,
620075, Ekaterinburg, Russia.
Corresponding author: I.A. Glebov, e-mail: i.glebov@igduran.ru.

Получена редакцией 08.04.2025; получена после рецензии 25.06.2025; принята к печати 10.09.2025.
Received by the editors 08.04.2025; received after the review 25.06.2025; accepted for printing 10.09.2025.