ГИАБ. Горный информационно-аналитический бюллетень /
MIAB. Mining Informational and Analytical Bulletin, 2023;(11-1):24-37
ОРИГИНАЛЬНАЯ СТАТЬЯ / ORIGINAL PAPER

УДК 622.684 DOI: 10.25018/0236_1493_2023_111_0_24

ОБОСНОВАНИЕ РАЦИОНАЛЬНЫХ РЕЖИМОВ РАБОТЫ КАРЬЕРНЫХ АВТОСАМОСВАЛОВ ПРИ СВЕРХНОРМАТИВНОЙ ЭКСПЛУАТАЦИИ

Г.Ю. Вишняков[1], А.Е. Пушкарев[2], Е.Ю. Ботян[1], В.С. Хлопонина[1]

[1] Санкт-Петербургский горный университет императрицы Екатерины II, Санкт-Петербург, Россия, e-mail: geroibeka@yandex.ru
[2] Санкт-Петербургский государственный архитектурно-строительный университет, Санкт-Петербург, Россия

Аннотация: Представлено исследование, направленное на определение рациональной интенсивности загрузки карьерных автосамосвалов с целью сокращения убытков, вызванных простоями техники в сложных горнотехнических условиях. Исследование включает сбор и анализ данных о работе автосамосвалов, в том числе значения суточного грузооборота, параметры, характеризующие простои техники, а также предполагаемые причины отказа узлов самосвала. В результате обработки собранных данных была разработана математическая модель, базирующаяся на системе из двух уравнений, где первое уравнение отражает зависимость числа дней прогнозируемых простоев карьерного автосамосвала от грузооборота и степени перегрузки автосамосвала, второе уравнение показывает зависимость грузооборота от степени перегрузки самосвала и длительности предшествующей перегрузки. Разработанная модель позволяет установить рациональную интенсивность перегрузки автосамосвала, при которой снижается вероятность появления отказа и сокращается длительность возможных простоев. Модель была проверена на данных о работе автосамосвалов в сложных горнотехнических условиях путем сравнения прогнозируемых и фактических значений простоев. Проанализированы графики месячной производительности и простоев автосамосвала по различным причинам отказа узлов самосвалов. На основании полученных результатов разработаны рекомендации по обоснованию рациональной интенсивности превышения нормативной загрузки автосамосвала с целью снижения общего числа простоев техники и тем самым сокращения возможных убытков.

Ключевые слова: карьерный автосамосвал, простой, режим работы, грузооборот, горнодобывающее предприятие, параметр, интенсивность, транспортная система, надежность, прогноз.

Для цитирования: *Вишняков Г. Ю., Пушкарев А. Е., Ботян Е. Ю., Хлопонина В. С.* Обоснование рациональных режимов работы карьерных автосамосвалов при сверхнормативной эксплуатации // Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2023. – № 11-1. – С. 24–37. DOI: 10.25018/0236_1493_2023_111_0_24.

Justification of rational modes of operation of quarry dump trucks in case of over-normative operation

G.Yu. Vishnyakov[1], A.E. Pushkarev[2], E.Yu. Botyan[1], V.S. Khloponina[1]

[1] Empress Catherine II Saint-Petersburg Mining University, Saint-Petersburg, Russia, e-mail: geroibeka@yandex.ru
[2] Saint-Petersburg State University of Architecture and Civil Engineering, Saint-Petersburg, Russia

© Г.Ю. Вишняков, А.Е. Пушкарев, Е.Ю. Ботян, В.С. Хлопонина. 2023.

Abstract: The research aimed at determining the rational intensity of loading of open-pit dump trucks in order to reduce losses caused by equipment downtime in difficult mining conditions is presented. The study includes the collection and analysis of data on the operation of dump trucks, including the values of the daily turnover of cargo, parameters that characterize the downtime of equipment, as well as the anticipated causes of failure of dump truck units. As a result of processing the collected data, a mathematical model based on a system of two equations was developed, where the first equation reflects the dependence of the number of days of predicted downtime of the dump truck on cargo turnover and the degree of dump truck overload, the second equation shows the dependence of cargo turnover on the degree of dump truck overload and the duration of the preceding overload. Thus, the developed model allows you to establish a rational intensity of dump truck overloading, which reduces the probability of failure and reduces the duration of possible downtime. The model was tested on data on the operation of dump trucks in difficult mining conditions by comparing predicted and actual downtime values. According to the results of the study, an analysis of the graphs of monthly productivity and downtime of dump trucks for various reasons of failure of dump trucks. Based on the results, recommendations on substantiation of rational intensity of exceeding the normative load of dump truck in order to reduce the total number of equipment downtime and thus reduce possible losses have been developed.

Key words: dump truck, machine downtime, operating mode, cargo turnover, mining company, parameter, intensity, transport system, reliability, prediction.

For citation: Vishnyakov G. Yu., Pushkarev A. E., Botyan E. Yu., Khloponina V. S. Justification of rational modes of operation of quarry dump trucks in case of over-normative operation. *MIAB. Mining Inf. Anal. Bull.* 2023;(11-1):24-37. [In Russ]. DOI: 10.25018/0236_1493_2023_111_0_24.

Введение

Одной из ключевых целей в горнодобывающей промышленности является поиск способов повышения эффективности использования техники с целью сокращения затрат на добычу полезного ископаемого. В этой связи вопрос определения рациональной интенсивности превышения нормативной загрузки автосамосвалов является актуальным, так как перегрузка техники может привести к потере ее работоспособности [1, 2] и, как следствие, простоям, связанным с ее восстановлением, а также к значительным убыткам для предприятия [3, 4]. В настоящий момент основной тенденцией развития механизации в горном деле является отход от линейного увеличения объемов добычи полезного ископаемого за счет уменьшения числа единиц транспортной техники и одновременного повышения эффективности выполняемых работ [5], в результате чего уменьшается единичная стоимость добычи руды. Известно, что в структуре затрат на добычу полезного ископаемого на его транспортирование приходится до 60% от себестоимости [6, 7]. Таким образом, вопрос обоснованной интенсификации эксплуатации карьерных автосамосвалов приобретает особую важность.

Ввиду отсутствия уточненной связи между степенью тяжести отказа и сверхнормативной эксплуатацией машины [8] существующие на сегодняшний момент

стратегии по организации комплекса мер по поддержанию заданного уровня надежности не в полной мере способны обеспечить решение своей основной задачи, что на практике приводит к сокращению средней наработки на отказ узлов и агрегатов техники, увеличению продолжительности [9] проведения текущего и планового ремонтов, а также повышению вероятности возникновения внезапных отказов [10].

Важно отметить, что простои техники и оборудования влекут за собой потери дохода для предприятия, и зачастую весьма существенные [11, 12]. Так на крупных предприятиях горной отрасли при определении убытков, вызванных одним моточасом простоя автосамосвала, величина недополученной прибыли в зависимости от типа полезного ископаемого может достигать примерно 20 тыс. долл. [13, 14].

Для устранения обозначенной проблемы необходимо установить зависимость между степенью перегрузки автосамосвала и количеством дней прогнозируемых простоев, на ее основе сформировать математическую модель и разработать рекомендации по определению рациональной интенсивности превышения нормативной загрузки автосамосвала.

С целью решения указанной задачи были разработаны системы удаленного мониторинга технического состояния горнотранспортного комплекса [15, 16], позволяющие получить значения множества снимаемых параметров, относящихся как к конкретной единице техники, так и к ее общему классу (сортировка по модели, классу грузоподъемности, типу выполняемой операции и т.д.) в режиме реального времени или в виде отчета за заданный период времени [17, 18].

В общем виде, все аналогичные системы оборудованы модулями мониторинга групп параметров [18]. Так, например, наиболее старые и простые, широко представленные на предприятиях горной отрасли в России [19, 20] из-за наименьшего срока амортизации, оборудованы лишь системой контроля загрузки и топлива (СКЗИТ), модулем диспетчеризации и отслеживания положения машины в пространстве [21]. Самые современные системы удаленного мониторинга обладают возможностью дистанционно снимать функциональные параметры как отдельных узлов и агрегатов машин (давление в пневмогидроцилиндрах подвески, температура сжатого воздуха в шинах и т.д.), так и комплексные параметры целых систем (двигатель внутреннего сгорания, система управления тяговым электроприводом и гидравлическая система) [22].

Очевидно, что появление возможности оперативного удаленного мониторинга отдельных функциональных параметров карьерных автосамосвалов в скором времени позволит улучшить оперативность принятия решений по обоснованию рациональных режимов работы техники и перейти к безлюдной выемке и транспортированию горной массы [23].

Чем больше количество параметров функционирующей техники постоянно контролируется, тем выше возможность оперативного корректирования формата работы автосамосвала с целью предотвращения возникновения критических отказов и потери работоспособности, и тем точнее будет прогноз ожидаемого экономического эффекта при условии уточнения существующих методик учета установленного уровня надежности машин. Ключевым фактором, по которому производится оценка текущего уровня надежности автосамосвала, является коэффициент технической готовности (КТГ), показывающий вероятность того, что объект окажется работоспособным в произвольный момент времени, кроме планируемых периодов, в течение которых использование объекта по назна-

чению не допускается. С учетом естественного старения узлов и агрегатов машины, а также неэффективного использования техники, КТГ с каждым годом будет уменьшаться. Сохранение установленного значения КТГ на уровне предыдущего периода эксплуатации является основным критерием сохранения эффективности автосамосвала и, как правило, достигается посредством снижения интенсивности эксплуатации машины. Задачей является поиск баланса между сокращением уровня падения КТГ, отслеживанием интенсивности перегрузки, сокращением моточасов простоя техники и, самое главное с точки зрения управления горным производством, — наибольшим положительным экономическим эффектом.

Обоснование рациональных режимов работы карьерных автосамосвалов посредством регулирования интенсивности перегрузки позволит усовершенствовать комплекс мер по поддержанию установленного уровня надежности машин посредством уточнения прогнозируемого значения дней простоя машины, корректирования графиков планово-предупредительных ремонтов, что, в свою очередь, окажет положительное влияние на экономический эффект предприятия.

Материалы и методы

Для выявления зависимости между показателями эффективности эксплуатации карьерных автосамосвалов и их текущим уровнем надежности был произведен анализ отчетов по итогам смены, полученных посредством системы автоматизированного управления горно-транспортным комплексом «Карьер» для парка из 5 единиц техники модели БЕЛАЗ-75307 грузоподъемностью 220 т, задействованных для перевозки апатит-штаффелитовой руды в период с 01.01.2020 по 31.12.2021 с нижнего рабочего горизонта до комплекса первичного дробления, расположенного на поверхности. Полученные данные содержали фактические значения суточного грузооборота и длительности простоев техники за сутки без учета простоев, связанных с организацией проведения ремонта: ожидание свободного места в ремонтном боксе, ожидание доставки требуемых запчастей, отсутствие водителя и т.д.

На текущий момент на предприятиях горной отрасли в качестве ключевого расчетного показателя эффективности функционирования карьерных автосамосвалов используется фактического значение совершенного ими грузооборота.

С целью количественной оценки сверхнормативной загрузки карьерного автосамосвала предлагается ввести понятие «степень перегрузки», как отношение фактического грузооборота к расчетному значению грузооборота, определенному согласно нормативной методике, за установленный период:

$$P_{п} = A_{факт} / A_{расч} \quad (1)$$

где $P_{п}$ — степень перегрузки карьерного автосамосвала; $A_{факт}$ — фактическое значение грузооборота за период сверхнормативной загрузки, т·км; $A_{расч}$ — значение грузооборота, рассчитанное по нормативной методике, за аналогичный период, т·км.

Для установления нормированного суточного грузооборота был произведен тягово-эксплуатационный расчет пневмоколесного транспорта согласно методике, принятой на предприятии, при известной и неизменной геометрии трассы транспортирования с постоянным коэффициентом трения качения, с предельной загрузкой кузова, равной номинальной.

На основании записей бортовых журналов карьерных автосамосвалов БЕЛАЗ, полученных из системы удаленного мониторинга «Карьер», были построены суточные графики по рейсам (рис. 1).

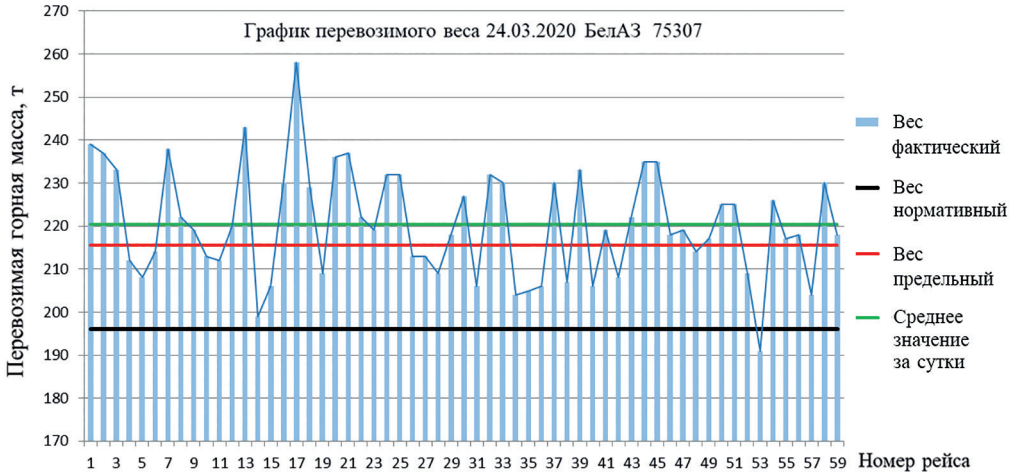

Рис. 1. Суточный график перевозимой горный массы, разделенный по рейсам
Fig. 1. Graph of diurnal transported rock mass divided by each run

По результатам анализа суточных графиков (рис. 1) можно сделать вывод, что примерно 75% рейсов в течение суток автосамосвал выполняет с превышением нормативного уровня загрузки кузова (рис. 1, красная линия) относительно нормативного веса (рис. 1, синяя линия), а также предельно допустимого веса, который составляет 110% от нормативного веса (рис. 1, черная линяя) согласно рекомендациям завода-изготовителя.

Результаты

Анализ значительного числа аналогичных суточных графиков позволил сделать вывод о нерациональном использовании машины. Следующий этап заключался в построении месячных графиков на основе анализа информации о грузообороте: режимов работы, простоев и других аспектов эксплуатации карьерных автосамосвалов (рис. 2).

На рис. 2 изображены: суточный грузооборот, выраженный в тоннах груза, перевезенных на километр пути (рис. 2, синие столбцы), данные о часах простоев по причине отказов (рис. 2, красная линия), а также запланированный грузооборот на год, рассчитанный по стандартной методике планирования суточного грузооборота (рис. 2, черная линия). Простои ввиду подготовки и проведения технического обслуживания (ТО) и другие причины простоев автосамосвала не учитывались.

Исходя из представленных графиков были сделаны выводы, заключающиеся в том, что перед каждым отказом, независимо от его характера, имели место значительные перегрузки машины — «пиковые значения перегрузки», порой весьма продолжительные (до 5 сут).

Важно отметить, что суточный грузооборот связан как с длительностью превышения нормативной загрузки, так и со степенью тяжести последовавшего отказа, при этом характер отказа может быть любым.

Посредством проведения многофакторного корреляционного анализа данных, полученных из отчетов системы удаленного мониторинга, была составлена следующая система уравнений:

$$\begin{cases} y_1 = 21662{,}1 \cdot P_{\text{п}} - 5{,}3 \cdot x_1 - 997{,}3; \\ y_2 = 20516{,}4 \cdot P_{\text{п}} - 19 \cdot x_2 + 348{,}8 \end{cases} \quad (2)$$

где y_1 — суточный грузооборот, связанный с предшествовавшей перегрузкой,

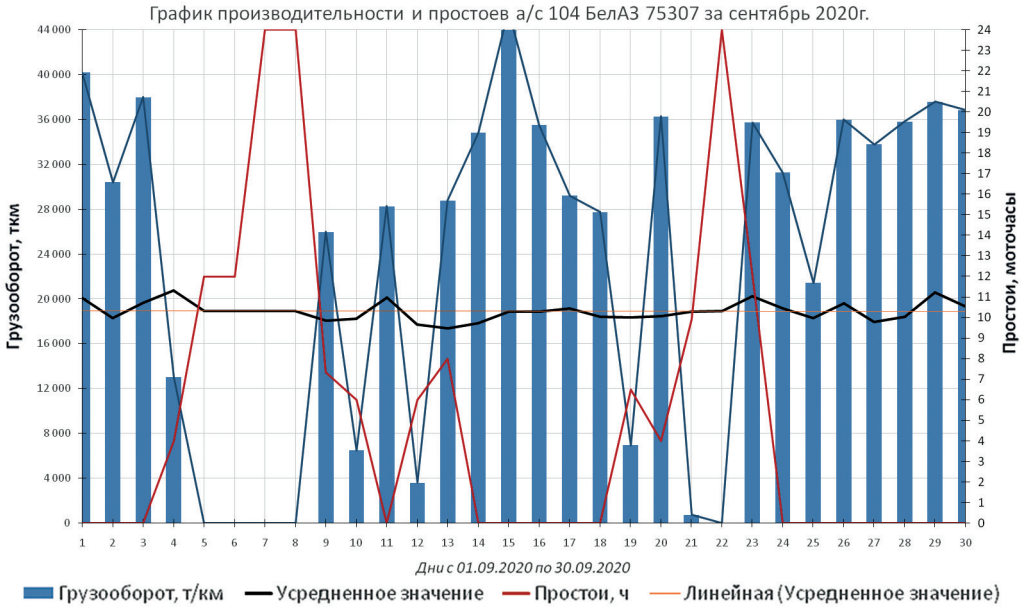

Рис. 2. Пример зависимости производительности и простоев автосамосвала в течение месяца
Fig. 2. Example of dependence of productivity and downtime of a dump truck during a month truck performance and downtime during the month

т·км; P_n — степень перегрузки машины; x_1 — длительность превышения нормативной загрузки, моточас; y_2 — суточный грузооборот, связанный с тяжестью последовавшего отказа, т·км; x_2 — длительность простоя, последовавшего в результате отказа, моточас.

При решении задачи по установлению зависимости между грузооборотом карьерного автосамосвала, связанным с количеством часов простоя из-за возникшего отказа, и фактором надежности, в качестве фактора надежности предлагается выбрать тяжесть последовавшего отказа, выраженную в моточасах простоя, представляющую собой продолжительность непосредственных работ по восстановлению работоспособности машины.

Рассматривая полученные уравнения регрессии (2), можно предположить, что при известных фактических значениях среднесуточного грузооборота и параметрах трассы транспортирования реально определить количество дней сверхнормативной эксплуатации и простоя машины в течение года.

При неизменных режимах работы машины и маршрутах транспортирования горной массы в течение года, за исключением подвигания фронта выемочных работ экскаватором, единственным эксплуатационным параметром, позволяющим регулировать грузооборот, становится значение загрузки кузова карьерного автосамосвала. На основании полученной математической модели, состоящей из двух уравнений, была составлена программа, позволяющая уточнить проектные значения эксплуатационных параметров техники. Блок-схема данной программы показана на рис. 3.

В качестве исходных данных используются характеристики условий эксплуатации и технические характеристики автосамосвалов. Согласно методике тягово-эксплуатационного расчета пневмоколесного транспорта, с учетом из-

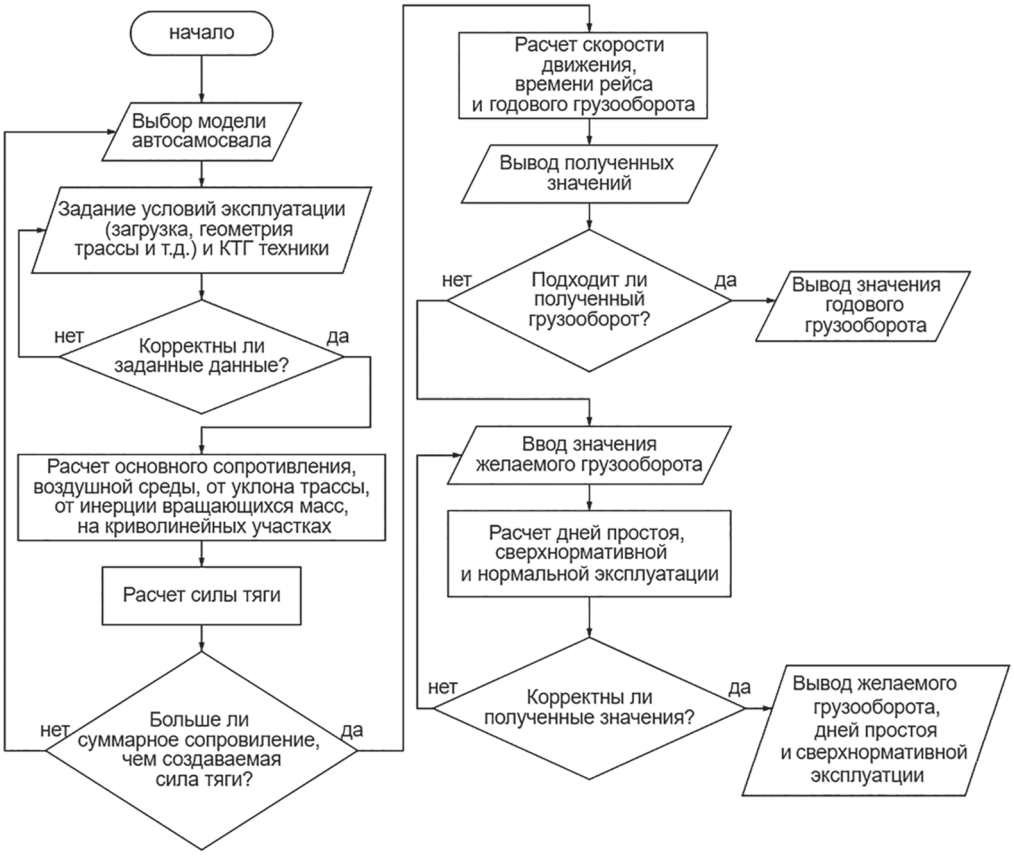

Рис. 3. Принципиальная блок-схема уточненного расчета годового грузооборота согласно разработанной методике

Fig. 3. Principle block diagram for clarified calculating the annual cargo turnover according to the developed methodology

вестных горнотехнических параметров ведения работ и установленного уровня надежности рассчитывались значения скорости на каждом из участков трассы, время выполнения рейса и годовой грузооборот при номинальной загрузке кузова. При необходимости установления факторов, влияющих на интенсивность перегрузки, указывалось значение грузооборота, отличного от нормативного. Посредством использования разработанной математической модели были получены значения прогнозируемых дней простоя и сверхнормативной эксплуатации.

С целью установления численного критерия, отражающего степень перегрузки карьерного автосамосвала за год при превышении номинальной загрузки, предлагается ввести понятие «интенсивности перегрузки» карьерного автосамосвала:

$$Y = P_n / N_{пр} \quad (3)$$

где Y — интенсивность перегрузки; $N_{пр}$ — количество дней сверхнормативной эксплуатации машины.

Обсуждение

Для определения потерь от одного моточаса простоя транспортной техни-

ки следует принять во внимание тот факт, что они будут складываться из разности упущенной выгоды (потенциальный упущенный доход *Д*) за 1 моточас простоя и расходов на транспортирование (*Р*), которые потенциально могли быть понесены за 1 моточас функционирования автосамосвала:

$$B_{1мм} = Д - P, \qquad (4)$$

где $B_{1мм}$ — потери от одного часа простоя автосамосвала, руб.; *Д* — потери, связанные с недополученным доходом от 1 ч простоя автосамосвала, руб.; *Р* — расходы на транспортирование в течение 1 моточаса для одного автосамосвала, руб.;

Расходы на транспортирование будут включать в себя следующие составляющее:

$$P = \frac{C_{тр\text{-}ния\ 1\ т.км} \cdot A_{год}}{N_{раб\ в\ год} - N_{пр}} \cdot K \qquad (5)$$

где $N_{пр}$ — количество моточасов простоя самосвала за год, шт; $C_{тр\text{-}ния\ 1\ т\cdot км}$ — стоимость перевозки 1 т·км руб./т·км; $A_{год}$ — годовой объем грузоперевозок, осуществленных одним автосамосвалом, т·км; $N_{раб\ в\ год}$ — число рабочих моточасов за год, шт; *К* — коэффициент, отражающий удельный вес расходов, не связанных с непосредственным производством готовой продукции, в структуре себестоимости продажи полезного ископаемого.

При анализе бухгалтерской отчетности предприятия было установлено, что расходы, не связанные напрямую с объемом добычи полезного ископаемого (коммерческие и управленческие расходы), составляют примерно 52% от себестоимости продаж. Таким образом, получим *К* = 0,48.

Потенциальный упущенный доход будет включать в себя следующие составляющее:

$$Д = C_{1\ т\ руды} \cdot Q_{руд\ 1\ мч} \cdot \gamma \qquad (6)$$

где $C_{1\ т\ руды}$ — стоимость продажи 1 т руды, руб.; $Q_{руд\ 1\ мч}$ — средний объем перевезенной руды за 1 моточас, м^3; γ — плотность руды, т/м^3.

Ввиду того, что перевозится не только руда, но и вскрышные породы, целесообразно учесть коэффициент вскрыши:

$$Д = N_{пр} \cdot C_{1\ т\ руды} \cdot Q_{руд\ 1\ мч} \cdot \gamma = N_{пр} \cdot C_{1\ т\ руды} \cdot (Q_{гм\ за\ 1\ мч} / K_{вск}) \cdot \gamma \cdot K_{дол} \qquad (7)$$

где $Q_{гм\ за\ 1\ мч}$ — объем перевезенной горной массы за 1 моточас, м^3; $K_{вск}$ — коэффициент вскрыши.

В связи с тем, что автосамосвалы являются не единственным элементом технологической цепочки, формирующей выручку, примем их долю от итоговой выручки, равной 10%.

Отрабатываемое месторождение содержит три вида полезных ископаемых,

Таблица 1

Исходные данные
Initial data

Наименование	2020	2021
Расходы на транспортирование, млн руб.	4207	5469
Стоимость железнорудного концентрата, тыс. руб.	4,76	9,93
Стоимость апатитового концентрата, тыс. руб.	19,05	20,41
Объем добытой руды, млн т	22,19	22,89
Объем произведенного железнорудного концентрата, млн т	5,5	5,8
Объем произведенного апатитового концентрата, млн т	2,2	2,3

но в дальнейших расчетах бадделеитовый концентрат не учитывается в связи с малым объемом его добычи (8 тыс. т/год в сравнении с 8,4 млн т/год остальной руды) и закрытой информации по ценам продажи.

Необходимые для дальнейших расчетов показатели получены из открытых источников, а также на предприятии:

- число рабочих моточасов в месяц — 724:
- число рабочих моточасов в год — 8688;
- средняя плотность руды – 3,05 т/м^3;
- коэффициент вскрыши — 1,75.

На основании данных из аналитических отчетов по итогу смены за каждый месяц работы (выгрузка из АСД «Карьер») за 2020 — 2021 гг., а также финансовых отчетов предприятия, исходные показатели представлены в табл. 1, результаты сравнения фактических данных и прогнозов представлены в табл. 2.

На основании ретроспективных данных 2020 г. о работе автосамосвала и предприятия в целом (1) было сформировано несколько проектных значений показателей работы в 2021 г. (3 и 4), которые можно сравнивать с фактическими данными 2021 г. (2).

Исходя из проектного значения 2021 П1 (см. табл. 2), понятно, что при одинаковом грузообороте и заданных рациональных режимах работы карьерного автосамосвала можно уменьшить количество простоев, сократив при этом годовые убытки.

В случае с проектным значением 2021 П2, напротив, при одинаковом КТГ больший грузооборот обеспечивается за счет регулирования режима работы автосамосвала.

Таблица 2

Сравнение фактических данных с прогнозами
The comparison of actual data with forecasts

Показатель	2020 факт	2021 факт	2021 П1	2021 П2
	1	2	3	4
Годовой объем, перевезенный самосвалом, тыс. м^3	797,92	686,55	790	
Годовой грузооборот, млн т	9,32	8,47	9,5	
Количество м/ч простоя, шт.	1584	1800	1368	1800
Перевезенный вес, млн т	2,43	2,09	2,41	
Средняя стоимость 1 т концентрата, тыс. руб.	8,83	12,9		
Коэффициент извлечения	0,35	0,35		
Выручка за 1 т руды, руб.	307,01	457,36		
Средний вес, перевозимый за 1 моточас, т	112,32	99,67	93,79	114,69
Среднегодовая интенсивность перегрузки, ×10^{-3}	4,8	4,3	4	4,9
Выручка за 1 моточас работы, руб.	60,1	79,45	74,76	91,42
Стоимость транспортирования 1 т·км, тыс. руб.	6,74	9,64	8,59	
Расходы при 1 моточасе работы самосвала, тыс. руб.	4,24	5,69	5,35	5,69
Суммарные потери за 1 моточас, тыс. руб.	55,86	73,76	69,41	85,73
Годовые убытки, млн руб.	88,48	132,77	94,95	154,32
КТГ автосамосвала	0,82	0,79	0,84	0,79

Таким образом, наиболее выгодный способ — 2021 П1, что подтверждается методикой определения интенсивности перегрузки, а также экономическим обоснованием.

В то же время в столбце 4, где наблюдается самая высокая интенсивность перегрузки, виден наилучший результат по показателям: средний вес, перевозимый за 1 моточас, выручка за 1 моточас. Указанный вариант характеризуется максимальным размером годовых убытков (среди всех рассматриваемых вариантов).

Подводя итоги, можно сделать вывод о том, что среднегодовая интенсивность перегрузки является критерием оценки рационального использования карьерного автосамосвала, то есть чем ниже интенсивность перегрузки, тем в более благоприятных условиях используется техника. В дальнейшем можно устанавливать границы, обусловленные экономической и технической целесообразностью.

На основе всего вышеперечисленного рекомендации по эксплуатации будут заключаться в следующем: регулярная обработка данных по грузообороту автосамосвала, вычисление степени интенсивности перегрузки позволят выбрать оптимальный режим работы, соответствующий конкретным условиям, который задается паспортом загрузки и контролируется системами мониторинга (например, режим жесткой экономии или же активное перевыполнение плана).

Заключение

Таким образом, в результате проведенных исследований была решена задача установления и обоснования рациональных режимов работы карьерных автосамосвалов в сложных горнотехнических условиях при их сверхнормативной эксплуатации с целью сокращения времени технологических простоев.

Результаты исследования:

1. Обоснована возможность повышения эффективности эксплуатации карьерных автосамосвалов посредством установления зависимости между интенсивностью превышения нормативной загрузки и количеством моточасов последовавших простоев.

2. Получена математическая модель, базирующаяся на системе из двух уравнений, одно из которых отражает зависимость суточного оборота от степени перегрузки и продолжительности перегрузки, а другое — суточный грузооборот от степени перегрузки и тяжести последовавшего отказа.

3. Разработана прикладная программа для расчета нормативного значения грузооборота, совершаемого автосамосвалом, в конкретных горно-геологических условиях, а также для прогнозирования количества дней перегрузки и ожидаемых простоев в зависимости от значения установленного грузооборота при сверхнормативной эксплуатации.

4. Обоснована методика, учитывающая сочетания годового значения грузооборота, коэффициента технической готовности и дней превышения нормативной загрузки через предлагаемый критерий рациональной среднегодовой интенсивности перегрузки.

5. В качестве проверки предлагаемой методики был произведен расчет ожидаемого экономического эффекта согласно трем разным подходам с учетом использования фактических данных, полученных из аналитических отчетов системы диспетчеризации «Карьер». В конечном итоге, перед предприятием будет стоять выбор: использовать технику в режиме рациональной нагрузки, обусловленной низкой степенью интенсивности перегрузки, или, напротив, использовать технику в режиме максимальной нагрузки, несмотря на большое количество простоев.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Zhukovskiy Y., Buldysco A., Revin I.* Induction motor bearing fault diagnosis based on singular value decomposition of the stator current // Energies. 2023, vol. 16, no. 8, article 3303. DOI: 10.3390/en16083303.

2. *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.

3. *Матрохина К. В., Трофимец В. Я., Мазаков Е. Б., Маховиков А. Б., Хайкин М. М.* Развитие методологии сценарного анализа инвестиционных проектов предприятий минерально-сырьевого комплекса // Записки Горного института. — 2023. — Т. 259. — С. 112—124. DOI: 10.31897/PMI.2023.3.

4. *Ворошилов Г. А.* Тенденции и перспективы применения карьерного автотранспорта на горнодобывающих предприятиях Уральского региона / Карьерный транспорт 2002 г.: Материалы научно-практической конференции. — Жодино: ПО «БелАЗ». 2002. — С. 50—52.

5. *Чантурия В. А., Трубецкой К. Н., Каплунов Д. Р., Чаадаев А. С., Махрачев А. Ф.* Комплексные исследования и внедрение инновационных геотехнологий добычи и глубокой переработки кимберлитов // Горный журнал. — 2011. — № 1. — С. 10—13.

6. *Bolobov V. I., Chupin S. A., Akhmerov E. V., Plaschinskiy V. A.* Comparative wear resistance of existing and prospective materials of fast-wearing elements of mining equipment // Materials Science Forum. 2021, vol. 1040, pp. 117—123. DOI: 10.4028/www.scientific.net/MSF.1040.117.

7. *Qun Wang, Ruixin Zhang, Shuaikang Lv, Yangting Wang* 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.

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

9. *Воронов А. Ю., Воронов Ю. Е.* Мультиуровневая модель управления экскаваторно-автомобильными комплексами разрезов // Горное оборудование и электромеханика. — 2019. — № 5(145). — С. 8—15. DOI: 10.26730/1816-4528-2019-5-8-15.

10. *Troyanovskaya I.* Influence of mountain conditions on road fuel consumption (example of the Republic of Tajikistan) // Transportation Research Procedia. 2022, vol. 61, pp. 273—279. DOI: 10.1016/j.trpro.2022.01.045.

11. *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.

12. *Ворошилов Г. А., Лель Ю. И.* Энергоемкость транспортных систем карьеров: оценка и перспективы // Горная техника. — 2009. — № 1. — С. 42—49.

13. *Nazarychev A. N., Dyachenok G. V., Sychev Y. A.* A reliability study of the traction drive system in haul trucks based on failure analysis of their functional parts // Journal of Mining Institute. 2023, vol. 261, pp. 363—373. DOI: 10.00000/PMI.2023.0.

14. *Лель Ю. И., Исаков С. В., Ганиев Р. С., Буднев А. Б., Глебов И. А.* К обоснованию параметров крутонаклонных автосъездов при вскрытии глубоких горизонтов кимберлитовых карьеров // Известия вузов. Горный журнал. — 2020. — № 7. — С. 21—33. DOI: 10.21440/0536-1028-2020-7-21-32.

15. *Лель Ю. И., Глебов И. А.* Обоснование оптимального уклона крутонаклонных автосъездов для полноприводных автосамосвалов, эксплуатируемых при доработке алмазорудных месторождений // Горная промышленность. — 2022. — № S1. — С. 95—99. DOI: 10.30686/1609-9192-2022-1S-95-99.

16. *Махараткин П. Н., Абдулаев Э. К., Вишняков Г. Ю., Ботян Е. Ю., Пушкарев А. Е.* Повышение эффективности функционирования карьерных автосамосвалов на основе обос-

нования 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.

17. *Qing-Dong Yan, Xiu-Qi Chen, Hong-chao Jian, Wei Wei, Wei-Da Wang, Heng Wang* 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.

18. *Kuznetsov D., Kosolapov A.* Dynamic of performance of open-pit dump trucks in ore mining in severe climatic environment // Transportation Research Procedia. 2022, vol. 63, pp. 1042—1048. DOI: 10.1016/j.trpro.2022.06.104.

19. *Серегин А. С.*, *Фазылов И. Р.*, *Прохорова Е. А.* Обоснование безопасных условий работы горнотранспортных машин с двигателями внутреннего сгорания по фактору выделения загрязняющих веществ // Горный информационно-аналитический бюллетень. — 2022. — № 11. — С. 37—51. DOI: 10.25018/0236_1493_2022_11_0_37.

20. *Kumykova T. M.*, *Kumykov V. Kh.* Method of shaping loading-and-transportation system in deep open pit complex ore mines // Journal of Mining Science. 2018, vol. 53, pp. 708—717. DOI: 10.1134/S1062739117042702.

21. *Kuznetsov D. V.*, *Kosolapov A. I.* Research of the influence of the excavating and automotive equipment complexes parameters on the speed of faces advance // IOP Conference Series: Earth and Environmental Science. 2021, vol. 626, no. 1, article 012020. DOI: 10.1088/1755-1315/626/1/012020.

22. *Hasan H., Octariando R.* The effect of road grade on dump truck fuel consumption // SAE Technical Paper. 2022, vol. 1, article 5030. DOI: 10.4271/2022-01-5030.

23. *Patterson S. R.*, *Kozan 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. ГИАБ

REFERENCES

1. Zhukovskiy Y., Buldysco A., Revin I. Induction motor bearing fault diagnosis based on singular value decomposition of the stator current. *Energies*. 2023, vol. 16, no. 8, article 3303. DOI: 10.3390/en16083303.

2. 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.

3. Matrokhina K. V., Trofimets V. Y., Mazakov E. B., Makhovikov A. B., Khaykin M. M. Development of methodology for scenario analysis of investment projects of enterprises of the mineral resource complex. *Journal of Mining Institute*. 2023, vol. 259, pp. 112—124. [In Russ]. DOI: 10.31897/PMI.2023.3.

4. Voroshilov G. A. Tendencies and prospects of using open-pit transport at mining enterprises of Ural region. *Kar'ernyy transport 2002 g.: Materialy nauchno-prakticheskoy konferencii* [Career transport 2002: Materials of the scientific and practical conference], Zhodino: PO «BelAZ», 2002, pp. 50—52.

5. Chanturia V. A., Trubetskoy K. N., Kaplunov D. R., Chaadaev A. S., Makhrachev A. F. Comprehensive research and implementation of innovative geotechnologies for the extraction and deep processing of kimberlites. *Gornyi Zhurnal*. 2011, no. 1, pp. 10—13. [In Russ].

6. Bolobov V. I., Chupin S. A., Akhmerov E. V., Plaschinskiy V. A. Comparative wear resistance of existing and prospective materials of fast-wearing elements of mining equipment. *Materials Science Forum*. 2021, vol. 1040, pp. 117—123. DOI: 10.4028/www.scientific.net/MSF.1040.117.

7. Qun Wang, Ruixin Zhang, Shuaikang Lv, Yangting Wang Open-pit mine truck fuel consumption pattern and application based on multi-dimensional features and XGBoost. *Sus-*

tainable Energy Technologies and Assessments. 2021, vol. 43, pp. 89 — 99. DOI: 10.1016/j.seta.2020.100977.

8. 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].

9. Voronov A. Y., Voronov Y. E. Multilevel model of management of excavator-automobile complexes of sections. *Mining equipment and electromechanics*. 2019, no. 5(145), pp. 8 — 15. [In Russ]. DOI: 10.26730/1816-4528-2019-5-8-15.

10. Troyanovskaya I. Influence of mountain conditions on road fuel consumption (example of the Republic of Tajikistan). *Transportation Research Procedia*. 2022, vol. 61, pp. 273 — 279. DOI: 10.1016/j.trpro.2022.01.045.

11. Lel Y. I., Mescheryagin Y. B., Rebrin E. Y. Investigation of the operation of dump trucks of various load capacities during the completion of the Karagai quarry. *News of the Ural State Mining University*. 1993, no. 3, pp. 22 — 29. [In Russ].

12. Voroshilov G. A., Lel Y. I. Energy intensity of quarry transport systems: assessment and prospects. *Gornaya tekhnika*. 2009, no. 1, pp. 42 — 49. [In Russ].

13. Nazarychev A. N., Dyachenok G. V., Sychev Y. A. A reliability study of the traction drive system in haul trucks based on failure analysis of their functional parts. *Journal of Mining Institute*. 2023, vol. 261, pp. 363 — 373. DOI: 10.00000/PMI.2023.0.

14. Lel Y. I., Isakov S. V., Ganiev R. S., Budnev A. B., Glebov I. A. To substantiate the parameters of steeply inclined road crossings when opening deep horizons of kimberlite quarries. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedenii. Gornyi zhurnal*. 2020, no. 7, pp. 21 — 33. [In Russ]. DOI: 10.21440/0536-1028-2020-7-21-32.

15. Lel Y. I., Glebov I. A. Substantiation of the optimal slope of steeply inclined car exits for four-wheel drive dump trucks operated during the completion of diamond ore deposits. *Russian Mining Industry Journal*. 2022, no. S1, pp. 95 — 99. [In Russ]. DOI: 10.30686/1609-9192-2022-1S-95-99.

16. 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, no. 6-2, pp. 237 — 250. [In Russ]. DOI: 10.25018/0236_1493_2022_62_0_237.

17. Qing-Dong Yan, Xiu-Qi Chen, Hong-chao Jian, Wei Wei, Wei-Da Wang, Heng Wang 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.

18. Kuznetsov D., Kosolapov A. Dynamic of performance of open-pit dump trucks in ore mining in severe climatic environment. *Transportation Research Procedia*. 2022, vol. 63, pp. 1042 — 1048. DOI: 10.1016/j.trpro.2022.06.104.

19. Seregin A. S., Fazylov I. R., Prokhorova E. A. Justification of safe operating conditions for mining transportation machines powered by internal combustion engines using air pollutant emission criterion. *MIAB. Mining Inf. Anal. Bull.* 2022, no. 11, pp. 37 — 51. [In Russ]. DOI: 10 .25018/0236_1493_2022_11_0_37.

20. Kumykova T. M., Kumykov V. Kh. Method of shaping loading-and-transportation system in deep open pit complex ore mines. *Journal of Mining Science*. 2018, vol. 53, pp. 708 — 717. DOI: 10.1134/S1062739117042702.

21. Kuznetsov D. V., Kosolapov A. I. Research of the influence of the excavating and automotive equipment complexes parameters on the speed of faces advance. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*. 2021, vol. 626, no. 1, article 012020. DOI: 10.1088/1755-1315/626/1/012020.

22. Hasan H., Octariando R. The effect of road grade on dump truck fuel consumption. *SAE Technical Paper*. 2022, vol. 1, article 5030. DOI: 10.4271/2022-01-5030.

23. Patterson S. R., Kozan 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.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Вишняков Георгий Юрьевич[1] — аспирант,
e-mail: geroibeka@yandex.ru,
ORCID ID: 0000-0001-5050-4491,
Пушкарев Александр Евгеньевич — д-р техн. наук,
профессор, Санкт-Петербургский
государственный архитектурно-строительный
университет (СПбГАСУ),
e-mail: pushkarev-agn@mail.ru,
ORCID ID: 0000-0001-5546-015X,
Ботян Евгений Юрьевич[1] — аспирант,
e-mail: evgenybotyan@yandex.ru,
ORCID ID: 0000-0003-3395-935X,
Хлопонина Вера Сергеевна[1] — канд. экон. наук,
главный ученый секретарь,
e-mail: Khloponina_VS@pers.spmi.ru,
ORCID ID: 0000-0001-9029-2788,
[1] Санкт-Петербургский горный университет
императрицы Екатерины II.
Для контактов: Вишняков Г.Ю., e-mail: geroibeka@yandex.ru.

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

*G.Yu. Vishnyakov*1, Graduate Student,
e-mail: geroibeka@yandex.ru,
ORCID ID: 0000-0001-5050-4491,
A.E. Pushkarev, Dr. Sci. (Eng.),
Professor, Saint-Petersburg State University
of Architecture and Civil Engineering,
190005, Saint-Petersburg,
Russia, e-mail: pushkarev-agn@mail.ru,
ORCID ID: 0000-0001-5546-015X,
E.Yu. Botyan[1], Graduate Student,
e-mail: evgenybotyan@yandex.ru,
ORCID ID: 0000-0003-3395-935X,
V.S. Khloponina[1], Cand. Sci. (Econ.),
Chief Scientific Secretary,
e-mail: Khloponina_VS@pers.spmi.ru,
ORCID ID: 0000-0001-9029-2788,
[1] Empress Catherine II Saint-Petersburg Mining University,
199106, Saint-Petersburg, Russia.
Corresponding author: G.Yu. Vishnyakov, e-mail: geroibeka@yandex.ru.

Получена редакцией 06.07.2023; получена после рецензии 04.09.2023; принята к печати 10.10.2023.
Received by the editors 06.07.2023; received after the review 04.09.2023; accepted for printing 10.10.2023.