

УДК 622.23.05

**Воронов Артем Юрьевич**, канд. техн. наук, **Воронов Юрий Евгеньевич**, доктор техн. наук, профессор

Кузбасский государственный технический университет имени Т.Ф. Горбачева,  
650000, Россия, г. Кемерово, ул. Весенняя, 28

E-mail: voronovayu@kuzstu.ru

## **МУЛЬТИУРОВНЕВАЯ МОДЕЛЬ УПРАВЛЕНИЯ ЭКСКАВАТОРНО-АВТОМОБИЛЬНЫМИ КОМПЛЕКСАМИ РАЗРЕЗОВ**

---

***Аннотация:** Эффективность функционирования отечественных карьерных экскаваторно-автомобильных комплексов (ЭАК) достаточно низка из-за больших внутрисменных простоев оборудования в ожидании работы. Причинами этого являются нерациональная структура парков карьерных экскаваторов и самосвалов в составе ЭАК, нерациональное распределение самосвалов по экскаваторам в течение смены и другие факторы, присущие данному конкретному предприятию. Поэтому повышение качества функционирования ЭАК путем совершенствования управления совместной работой экскаваторов и самосвалов является актуальной задачей.*

***Цель работы** – повышение эффективности управления ЭАК на разрезах.*

***Методы исследования.** Разработан эвристический алгоритм принятия диспетчерских решений в условиях работы ЭАК по открытому циклу. Предложены параметры приоритетности экскаваторов и разработана математическая модель выбора экскаватора по окончании разгрузки самосвала. Разработан алгоритм поиска оптимальных параметров приоритетности по требуемому критерию эффективности работы группы экскаваторов и самосвалов. В основе данного алгоритма лежит имитационная модель работы ЭАК.*

***Результаты.** В результате численных экспериментов показано, что открытый цикл позволяет сократить простой и увеличить объем перевозок по сравнению с применяемым в настоящее время закрытым циклом. Предложенная модель учитывает случайные факторы, влияющие на время погрузки, разгрузки и движения самосвалов, ремонта экскаваторов и самосвалов, длительность межремонтных периодов. Простота модели принятия диспетчерских решений позволяет применять ее в режиме реального времени.*

***Ключевые слова:** открытые горные работы; экскаваторно-автомобильный комплекс; управление; диспетчеризация; оптимизация.*

***Информация о статье:** принята 11 ноября 2019 г.*

*DOI: 10.26730/1816-4528-2019-5-8-15*

Открытый способ разработки твердых полезных ископаемых является преобладающим во всем мире, в частности, в России и странах СНГ. Его удельный вес за последние десятилетия в СНГ достиг высокого уровня (в среднем около 75%) и по прогнозам будет долго сохраняться на этом уровне. Высокий удельный вес открытого способа объясняется его преимуществами перед подземным: более высокой производительностью труда – в 10-11 раз по разрезам; более низкой себестоимостью продукции – в 3-4 раза; сокращенным сроком строительства предприятий – в 2-3 раза [1].

В России удельный вес открытого способа в общем объеме добычи угля в настоящее время составляет около 74%, имеется тенденция к его увеличению. При этом большая часть российского угля добывается в Кузбассе (около 60%). Ведущими угольными предприятиями Кузбасса, осуществляющими добычу угля открытым способом, являются компании «Кузбассразрезуголь» и «СДС-Уголь», на долю

которых приходится около 20% добычи российского угля [2].

Основным видом транспорта на разрезах Кузбасса является автомобильный транспорт. Согласно официальным данным компании «Кузбассразрезуголь», в настоящее время им перевозится от 85 до 100% вскрыши и весь уголь.

С развитием автоматизированных методов планирования открытых горных работ и диспетчерского управления карьерным автотранспортом возникает необходимость создания математических моделей и алгоритмов, с помощью которых будут решаться задачи оперативного управления.

Известны два основных способа организации работы карьерного автотранспорта: закрытый и открытый.

При работе по закрытому циклу каждый автосамосвал в начале смены закрепляется за конкретным экскаватором и пунктом разгрузки и работает с ними в течение всей смены. Самосвалы

перезакрепляются только в случае изменения условий работы (например, при поломке экскаватора). Эта стратегия наименее эффективна, так как ввиду вероятностного характера транспортных процессов и простоев горного оборудования у отдельных экскаваторов периодически образуются очереди, в то время как другие экскаваторы могут простаивать ввиду отсутствия самосвалов. Наивысшей эффективности такая система достигает тогда, когда все экскаваторы работают непрерывно, а самосвалы подаются к экскаваторам через равные промежутки времени. Однако обеспечить своевременную подачу самосвалов к экскаваторам достаточно сложно из-за влияния случайных факторов.

Все отечественные разрезы в настоящее время организуют работу своих ЭАК по закрытому циклу, что приводит к большим простоям автосамосвалов, а иногда и экскаваторов. В работе [3] установлено, что наибольший удельный вес (около трети) среди возможных внутрисменных простоев автосамосвалов занимают именно простои в ожидании погрузки. Эти простои возникают в основном по причине неудовлетворительной организации работы ЭАК, и при эффективной организации их можно существенно сократить. Это позволит повысить степень использования техники и, как следствие, повысить производительность работы.

Для достижения этого можно использовать метод открытого цикла, при котором самосвал после разгрузки направляется к свободному (или малозагруженному) экскаватору на основании выбранного диспетчерского критерия. Это позволит значительно уменьшить простои погрузочно-транспортного оборудования и повысить его производительность. Однако здесь есть свои проблемы: во-первых, сложность такого управления, во-вторых, возможное несоответствие типоразмеров самосвалов и экскаваторов, что может привести к увеличению простоев самосвалов и снижению производительности ЭАК.

Поэтому более рациональным представляется видоизмененный метод открытого цикла, при котором формируются так называемые «группы диспетчеризации» из конкретных экскаваторов и погрузочных пунктов, которые будут работать вместе. Каждой из этих групп дается некоторое количество самосвалов, которые распределяются между пунктами погрузки по открытому циклу.

Динамическое распределение карьерных автосамосвалов между экскаваторами (диспетчеризация) традиционно используется для повышения эффективности использования техники на открытых горных работах. Первостепенная задача существующих систем диспетчеризации (СД) – сокращение капитальных и эксплуатационных расходов за счет более эффективного использования имеющихся самосвалов и экскаваторов в составе ЭАК. Диспетчеризация является динамическим процессом, требующим непрерывного мониторинга маршрутов, типоразмеров и местоположения самосвалов и экскаваторов. Применяя диспетчеризацию, можно либо повысить производительность ЭАК с имеющейся в наличии техникой, либо обеспечить желаемую

производительность с меньшим количеством техники. Этого можно добиться путем принятия оптимальных диспетчерских решений, что сокращает простои и улучшает использование горного оборудования. Самосвалы производительны лишь тогда, когда перевозят груз (полезное ископаемое или вскрышную породу), а погрузочные машины – когда загружают горную массу. Следовательно, простои свидетельствуют о непроизводительном использовании оборудования и должны быть сведены к минимуму.

Существует два основных подхода к диспетчеризации карьерного автотранспорта – одноуровневый и мультиуровневый [4]. При одноуровневом подходе самосвалы распределяют между экскаваторами, руководствуясь лишь имеющимся опытом, без учета каких бы то ни было специфических задач или условий производства. По сути, это эвристический подход, имеющий сугубо эмпирический характер. В мультиуровневых системах проблема диспетчеризации разбивается обычно на два уровня: на верхнем уровне происходит установление норм выработки для экскаваторов, на нижнем – распределение самосвалов между экскаваторами так, чтобы минимизировать отклонения от плана, установленного на верхнем уровне. На верхнем уровне обычно используется модель линейного или нелинейного программирования, а на нижнем – эвристический метод, так как диспетчерские решения должны приниматься в реальном времени. Приближенные методы, дающие быстрые решения, во многих случаях предпочтительнее, нежели точные решения оптимальными методами, поскольку точные решения требуют больших затрат времени [5].

Проблема диспетчеризации карьерного автотранспорта заключается в том, что для каждого автосамосвала, покидающего зону разгрузки, нужно подобрать наиболее подходящий пункт погрузки. Обычно таким пунктом является тот, что в наибольшей степени удовлетворяет какому-либо «диспетчерскому критерию» [6]. При распределении самосвалов между погрузочными пунктами используются различные критерии, и их общая цель – либо максимизировать производительность ЭАК, либо минимизировать неэффективное использование техники (простои) при заданных условиях. В работах [4, 6, 7] дается подробное описание этих критериев и существующих методов диспетчеризации. Наряду с вышеупомянутыми подходами в работе [4] выделяют также три основных стратегии диспетчеризации: «1 самосвал и N экскаваторов» [8], «M самосвалов и 1 экскаватор» [9], «M самосвалов и N экскаваторов» [10].

В целом, анализируя существующие методы диспетчеризации карьерного автотранспорта и описывающие их научные работы, можно отметить их общий недостаток: несмотря на большую значимость достигнутых результатов, вероятностная природа технологических процессов в карьерах либо не учитывается вообще либо учитывается недостаточно, а она присутствует всегда.

Этот недостаток можно устранить, если использовать для решения задачи диспетчеризации

карьерного автотранспорта имитационное моделирование. Как показали проведенные исследования, закономерности изменения времени выполнения технологических операций и ремонта различных видов техники наилучшим образом описываются гамма-распределением [3]. Кроме того, гамма-распределение для этих временных составляющих рекомендуется в классических работах по имитационному моделированию [11]. Процесс транспортирования горной массы описывается замкнутой (с неизменным числом заявок-самосвалов) сетью массового обслуживания, для которой получены аналитические формулы лишь при экспоненциальном распределении времени выполнения операций [12]. Это доказывает необходимость применения имитационного моделирования для решения диспетчерских задач.

Существует достаточно большое количество имитационных моделей, исследующих ЭАК карьеров. Подробные обзоры имеющихся моделей сделаны в работах [5, 13, 14]. Можно отметить, что все они служат либо для наглядного представления процессов в ЭАК и их дальнейшего изучения, либо для простой оценки эффективности предлагаемых методик, тогда как для действительно эффективной диспетчеризации необходимо «заглянуть в будущее», то есть результаты имитационного моделирования нужно использовать в дальнейшей работе ЭАК.

В данной работе предлагается диспетчерская модель, состоящая из двух уровней. На верхнем уровне формируются «группы диспетчеризации» для работы по открытому циклу. В группы сводятся экскаваторы, работающие с одним типом горной массы, расположенные на одном участке горных работ и способные обслуживаться самосвалами одного типоразмера. Последнее позволит свести к минимуму их простой в ожидании погрузки [15]. Также должно учитываться соотношение вместимостей кузовов и ковшей.

На нижнем уровне строится диспетчерский алгоритм для динамического распределения автосамосвалов между экскаваторами в реальном времени. Для сокращения суммарных простоев самосвалов и экскаваторов ожидаемый простой рассматриваемого самосвала при принятии диспетчерского решения должен стремиться к минимуму, то есть необходимо найти экскаватор, по прибытии к которому самосвал будет загружен через наименьший промежуток времени. Это позволит сократить очереди в ожидании погрузки, а также уменьшить вероятность возникновения простоев экскаваторов.

Поэтому предлагается следующий критерий принятия диспетчерских решений:

$$J = \underset{j}{\operatorname{argmin}} \frac{(T_j^e - t_c - T_j^m)_+ + \delta}{x_j}, \quad (1)$$

где  $J$  – номер экскаватора, к которому нужно будет отправить самосвал;  $T_j^e$  – ожидаемое «время освобождения» (окончания последней загрузки)  $j$ -го экскаватора, включая самосвалы, уже стоящие в очереди возле него, а также находящиеся на пути к нему;  $t_c$  – «текущее время», прошедшее с начала смены;  $T_j^m$  – ожидаемое «время движения»

распределяемого самосвала до  $j$ -го экскаватора;  $x_j$  – параметр приоритетности  $j$ -го экскаватора и соответствующего ему маршрута транспортирования;  $\delta$  – малое число, позволяющее в случае отсутствия простоев при возможности отправки самосвала на несколько направлений выбрать наиболее приоритетное.

Рассмотрим механизм выбора параметров приоритетности. Пусть  $n$  – количество экскаваторов в определенной группе, тогда  $X = (x_1, x_2, \dots, x_n)$  – вектор параметров приоритетности. Имитационное моделирование позволяет статистическими методами оценить характеристики системы  $C(X)$ . Для получения точной оценки необходимо провести расчет достаточно большого количества смен, поэтому для определения правила остановки можно использовать центральную предельную теорему теории вероятностей.

Пусть для  $k$  испытаний (прогонов имитационной программы)  $\hat{C}_k(X)$  – среднее значение характеристики,  $S_k^2$  – значение характеристики с выборочной дисперсией,  $\Delta C$  – допустимая погрешность. Тогда погрешность вычислений будет равна

$$P(|C(X) - \hat{C}_k(X)| < \Delta C) = F\left(\frac{\Delta C}{S_k^2}\right) - F\left(\frac{-\Delta C}{S_k^2}\right), \quad (2)$$

где  $F$  – функция стандартного нормального распределения.

Тогда количество прогонов программы  $k$  увеличивается до тех пор, пока вероятность попадания в доверительный интервал (2) не достигнет требуемой величины.

Следующая задача – поиск оптимальных параметров приоритетности:

$$X^* = \underset{X}{\operatorname{argmin}} \hat{C}_k(X). \quad (3)$$

Решение данной задачи требует значительных вычислительных ресурсов, так как оценка  $\hat{C}_k$  для каждого набора  $X$  получается в результате имитационного моделирования. Чтобы снизить затраты времени, используем следующий прием.

Из формулы (1) понятно, что при принятии диспетчерского решения важно отношение между параметрами приоритетности, то есть во сколько раз один параметр больше другого. Пусть первый параметр  $x_1 = 1$ , а шаг параметра  $q > 1$ . Зададим предельные отклонения параметров приоритетности  $q^{-m} < x_j < q^m$ . Таким образом, каждый параметр может принимать  $(2m + 1)$  значений. То есть для решения задачи (3) с помощью полного перебора потребуется  $(2m + 1)^{n-1}$  расчетов характеристики  $\hat{C}_k$ .

В качестве характеристики  $C(X)$  предлагается величина денежных потерь от простоев всех экскаваторов и всех самосвалов в рассматриваемой группе за смену. Поскольку стоимость простоев различных экскаваторов и самосвалов неодинакова, критерий выбора параметров приоритетности можно представить следующим образом:

$$C(X) = \sum_{j=1}^n C_j^s \cdot I_j^s + \sum_{j=1}^n C^t \cdot I_j^t \rightarrow \min, \quad (4)$$

где  $C_j^s$  – стоимость простоя  $j$ -го экскаватора, руб./ч;  $I_j^s$  – ожидаемое время простоя  $j$ -го экскаватора за смену, ч;  $C^t$  – стоимость простоя



Рис. 1. Схема принятия диспетчерского решения  
Fig. 1. Dispatching decision flowchart

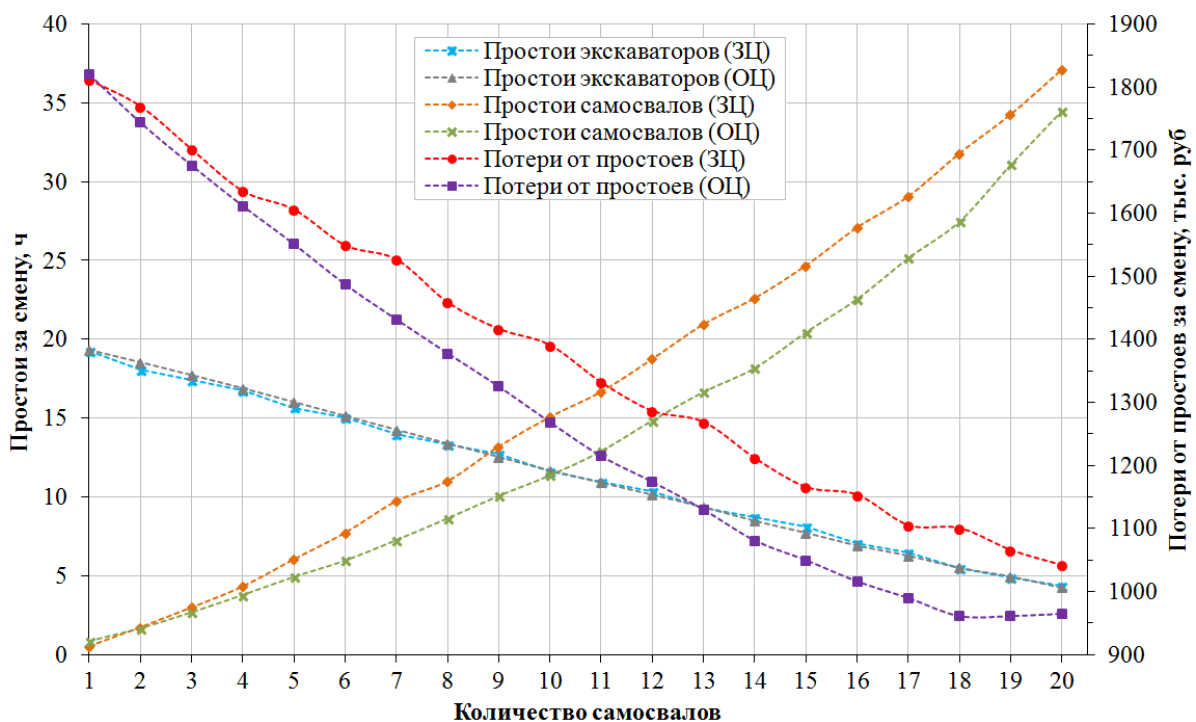


Рис. 2. Простои оборудования и потери от простоев при различных количествах самосвалов для закрытого (ЗЦ) и открытого (ОЦ) циклов работы  
Fig. 2. Downtime of equipment and losses due to downtime at various numbers of trucks for fixed and dynamic truck allocation

однотипных самосвалов в группе, руб./ч;  $I_j^t$  – ожидаемое время простоя самосвалов у  $j$ -го экскаватора за смену, ч.

Стоимость простоя каждого типа оборудования определяется как упущенная финансовая выгода от условно не добытого в результате простоя и, как следствие, не проданного угля. Ее можно приближенно определить по следующей формуле:

$$C = \frac{W_h}{r_s} \cdot C_c, \quad (5)$$

где  $W_h$  – эксплуатационная производительность единицы техники по вскрыше, м<sup>3</sup>/ч;  $r_s$  – коэффициент вскрыши, м<sup>3</sup>/т;  $C_c$  – средняя рыночная цена угля, руб./т.

В результате расчетов на имитационной модели для различного количества самосвалов в группе

выбирается набор параметров приоритетности, наилучшим образом удовлетворяющий условию (4), которое одновременно является оценкой эффективности диспетчерского алгоритма на нижнем уровне диспетчерской системы.

Параметры приоритетности сводятся в базу данных и в дальнейшем используются для принятия диспетчерских решений. При любом значительном изменении в условиях работы (например, замене экскаватора) параметры переоцениваются.

Примерная схема принятия диспетчерского решения о назначении порожнего самосвала представлена на рис. 1.

В условиях разреза «Кедровский» удалось выделить лишь одну группу диспетчеризации, соответствующую перечисленным выше условиям.

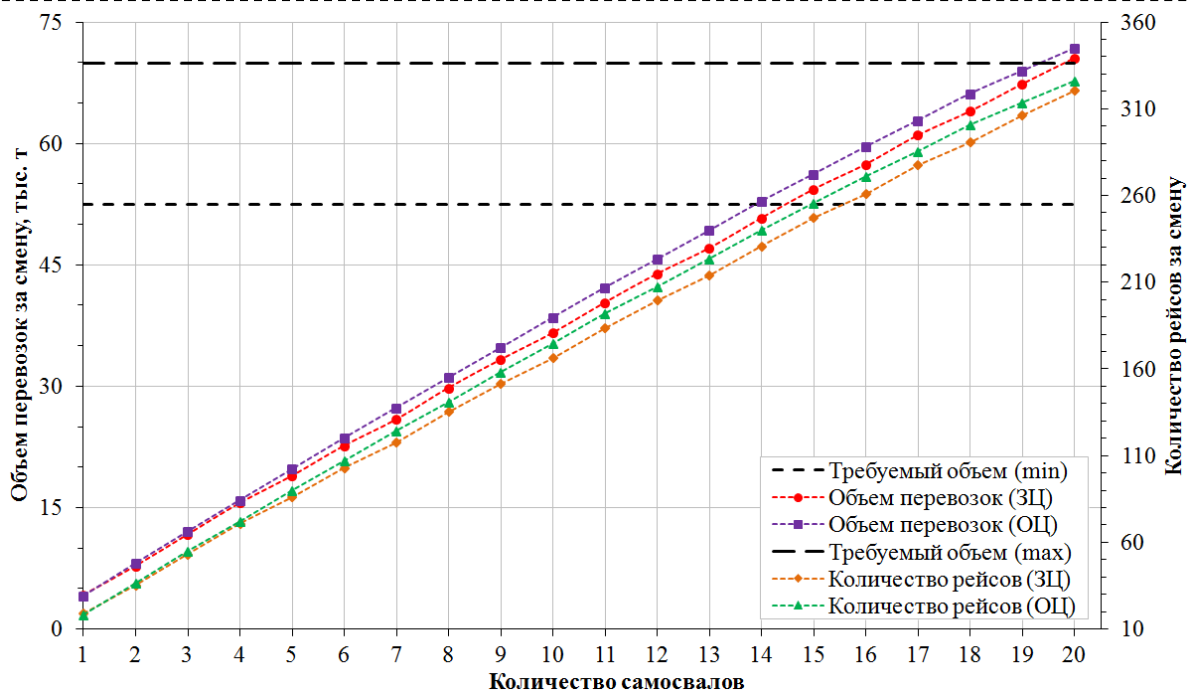


Рис. 3. Объем перевозок вскрыши и количество рейсов при различных количествах самосвалов для закрытого (ЗЦ) и открытого (ОЦ) циклов работы  
 Fig. 3. The volume of overburden and the number of hauls at various numbers of trucks for fixed and dynamic truck allocation

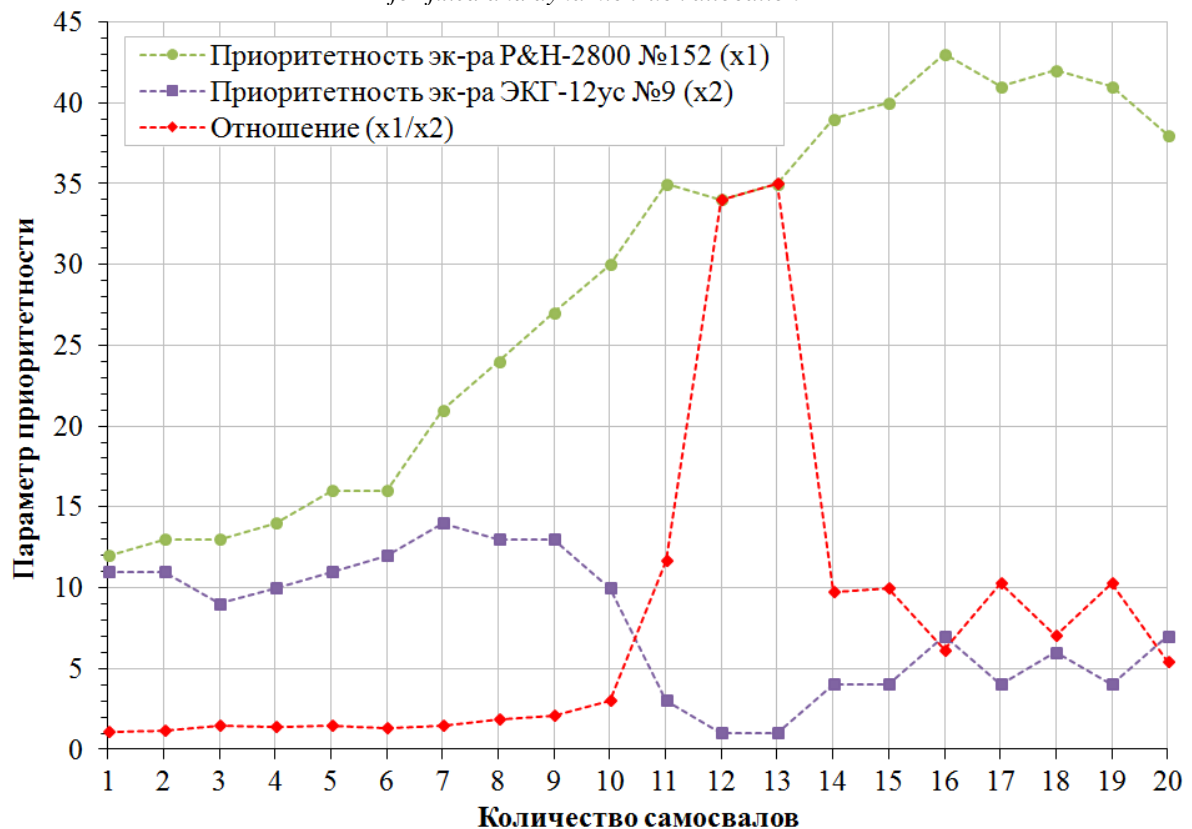


Рис. 4. Параметры приоритетности экскаваторов при различных количествах самосвалов для открытого цикла работы  
 Fig. 4. Shovel priority parameters at various numbers of trucks for dynamic truck allocation

Рассматривались перевозки только вскрышных пород, поскольку на угольных карьерах вскрыша составляет основной грузопоток. В группу вошли два экскаватора – Р&Н-2800 с ковшом объемом 33 м<sup>3</sup> и ЭКГ-12ус с ковшом объемом 12,5 м<sup>3</sup>, работавшие на

один отвал. Средние расстояния транспортирования, по данным АСД, составили 3,95 км для экскаватора Р&Н-2800 и 4,2 км для экскаватора ЭКГ-12ус. В группе использовались однотипные самосвалы БелАЗ-75306 грузоподъемностью 220 т.

Расчеты проводились для режимов работы ЭАК по закрытому и открытому циклам. Результаты расчетов приведены на рис. 2-4. Линии, соединяющие точки на графиках, физического смысла не имеют и добавлены для большей наглядности.

Из рис. 2 видно, что организация работы ЭАК по открытому циклу дает значительную экономию по сравнению с закрытым циклом – в основном за счет сокращения простоев автосамосвалов. При оптимальном для открытого цикла количестве самосвалов (18) сокращение потерь от простоев составляет 12,6%, или почти 139 тыс. рублей за смену. В среднем для разного количества самосвалов сокращение потерь от простоев составит 7,3%.

Работа по открытому циклу дает выигрыш и в плане производительности (рис. 3). При 14 самосвалах в группе закрытый цикл позволяет перевезти только 50800 тонн вскрыши, а открытый цикл – около 52900 тонн, то есть на 4% больше. Поэтому, если норма выработки будет установлена на уровне не ниже 52500 тонн за смену (что примерно соответствует реальной производительности экскаваторов в данной группе), то закрытый цикл потребует на один самосвал больше. Это говорит о том, что организация работы ЭАК по открытому циклу может дать экономию не только за счет сокращения простоев горного оборудования, но и за счет сокращения количества работающих самосвалов.

Нужно отметить, что оптимальное количество самосвалов по критерию минимума потерь от простоев не всегда достижимо на практике, поскольку ожидаемая выработка ЭАК при такой его структуре может быть выше или ниже производственного плана. В этом случае необходимо ограничиваться нормой выработки, примерно соответствующей реальной производительности действующих экскаваторов. Данное ограничение введено в предлагаемую имитационную модель, то есть программа позволяет выбирать только из тех вариантов, что обеспечивают достижение желаемой производительности. Это также сокращает время имитационных расчетов, что может стать существенным преимуществом.

Рис. 4 показывает, что более производительный экскаватор R&H-2800 с приоритетностью  $X_2$  при любом количестве самосвалов приоритетнее мало-мощного экскаватора ЭКГ-12ус с приоритетностью  $X_1$ . Это вполне очевидно: чем быстрее загружает экскаватор, тем быстрее он освобождается и тем больше вероятность его простоя. Стоимость простоя мощного экскаватора также больше, поскольку за время простоя он мог бы выполнить большую работу, а предприятие – получить большую выгоду. Следовательно, к нему нужно направлять больше самосвалов.

Но наибольший интерес представляет отношение параметров приоритетности друг к другу. Гладкий участок графика (от 1 до 10 самосвалов) свидетельствует о том, что при сравнительно небольшом количестве транспорта оба экскаватора во время принятия диспетчерских решений чаще всего

свободны. Следующий затем резкий скачок указывает на нестабильность ЭАК; вероятность спорных ситуаций при принятии диспетчерских решений резко возрастает. Далее, начиная с 14 самосвалов, ситуация вновь стабилизируется. Оба экскаватора загружены, наблюдается избыток самосвалов. На основании этих расчетов можно сделать вывод о рациональной численности самосвалов в группе. Это свойство можно использовать для оценки рационального количественного состава парка самосвалов в случае отсутствия на предприятии производственного плана (или отсутствия данных о нем).

В данной работе рассмотрена двухуровневая модель управления ЭАК разреза, в которой происходит динамическое распределение карьерных автосамосвалов по пунктам погрузки (экскаваторам). Введено понятие «параметра приоритетности» экскаватора и соответствующего ему маршрута транспортирования горной массы, а также показано, что работа карьерных ЭАК без закрепления самосвалов за экскаваторами и с учетом приоритетностей различных маршрутов дает значительную экономию денежных средств за счет сокращения простоев горного оборудования и сокращения числа работающих самосвалов.

В будущем планируется внедрить разработанную имитационную программу, служащую для расчета параметров приоритетности, в существующие системы диспетчеризации, действующие на разрезах Кузбасса. Также имеет смысл расширить функциональность модели, чтобы ее можно было использовать и на рудных карьерах.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Современные системы управления горно-транспортными комплексами / К.Н. Трубецкой [и др.]. – СПб. : Наука, 2007. – 306 с.
2. Таразанов, И.Г. Итоги работы угольной промышленности России за январь-декабрь 2017 года // Уголь. – 2018. – № 3. – С. 58-73.
3. Воронов, А.Ю. Оптимизация показателей эксплуатационной производительности экскаваторно-автомобильных комплексов разрезов : дис. ... канд. техн. наук. – КузГТУ, Кемерово, 2015.
4. Alarie, S. Overview of solution strategies used in truck dispatching systems for open pit mines / S. Alarie, M. Gamache // International Journal of Surface Mining, Reclamation and Environment. – 2002. – № 16(1). – P. 59-76.
5. Cetin, N. Open-pit truck/shovel haulage system simulation : Ph. D. thesis. – Middle East Technical University, Turkey, 2004.
6. Munirathinam, M. A review of computer-based truck dispatching strategies for surface mining operations / M. Munirathinam, J.C. Yingling // International Journal of Surface Mining, Reclamation and Environment. – 1994. – № 8(1). – P. 1-15.
7. Afrapoli, A.M. Mining fleet management systems: a review of models and algorithms / A.M. Afrapoli, H. Askari-Nasab // International Journal of Mining, Reclamation and Environment. – 2017. – P. 1-19.
8. Ataeeppour, N. ARENA simulation model for truck-shovel operation in despatching and non-

despatching modes / N. Ataepour, E.Y. Baafi // International Journal of Surface Mining, Reclamation and Environment. – 1999. – № 13(3). – P. 125-129.

9. White, J.W. On improving truck/shovels productivity on open pit mines / J.W. White, J.P. Olson, S.I. Vohnout // CIM Bulletin. – 1993. – № 86(973). – P. 43-49.

10. Temeng, V.A. Real-time truck dispatching using a transportation algorithm / V.A. Temeng, F.O. Otunoye, J.O. Frendewey // International Journal of Surface Mining, Reclamation and Environment. – 1997. – № 11(4). – P. 203-207.

11. Лоу, А.М. Имитационное моделирование / А.М. Лоу, В.Д. Кельтон. – СПб. : Питер, 2004. – 847 с.

12. Корягин, М.Е. Оптимальное управление грузопотоками при циклическом снабжении двух

потребителей / М.Е. Корягин, В.А. Чекменев // Вестник Кузбасского государственного технического университета. – 2003. – № 1. – С. 37-40.

13. Krause, A.J. Shovel-truck cycle simulation methods in surface mining : M. S. thesis. – University of the Witwatersrand, Johannesburg, 2006.

14. Stout, C.E. Simulation of a large multi-pit mining operation : M. S. thesis. – The University of Montana, 2011.

15. Вуейкова, О.Н. Обоснование рациональной структуры автомобильно-экскаваторного комплекса открытого горнорудного карьера : дис. ... канд. техн. наук. – ЮУрГУ, Оренбург, 2013.

**Artyom Yu. Voronov**, C. Sc. in Engineering, **Yuri E. Voronov**, Dr. Sc. in Engineering, Professor

T.F. Gorbachev Kuzbass State Technical University, 28, Vesennyaya street, Kemerovo, 650000, Russian Federation

## MULTISTAGE MODEL FOR SHOVEL-TRUCK SYSTEM MANAGEMENT AT OPEN-PIT COAL MINES

**Abstract:** *The urgency of the discussed issue. The efficiency of the domestic mining shovel-truck systems (STSs) operation is quite low due to the high equipment downtime in anticipation of work during the shift. The reasons for this are: the inappropriate structure of mining shovel and truck fleets in the STS, inappropriate truck allocation and assignments during the shift, and other factors specific to the particular mine. Therefore, improving the quality of the STSs operation by improving the management of the joint shovel-truck operation is an urgent task.*

**The main aim of the study** – improving the management of STSs at open-pit coal mines.

**The methods used in the study.** A heuristic algorithm for making dispatching decisions in the conditions of the STS operating in an unfixed mode is developed. Priority parameters for shovels are proposed and a mathematical model for selecting a shovel after truck unloading is developed. An algorithm is developed for finding optimal priority parameters according to the required criterion of the efficiency of a group of shovels and trucks. The basis of this algorithm is a simulation model of the STS.

**The results.** As a result of numerical experiments, it is shown that an unfixed mode allows reducing downtime and increasing the production as compared with the fixed mode currently used. The proposed model takes into account random factors that affect the truck loading, dumping and moving times, shovel and truck repair times, the duration of overhaul periods. The simplicity of the dispatch decision-making model allows it to be applied in real time.

**Keywords:** open-pit mining; shovel-truck system; management; dispatching; optimization.

**Article info:** received November 11, 2019

DOI: 10.26730/1816-4528-2019-5-8-15

### REFERENCES

1. Trubetskoy K.N. [et al.] Sovremennye systemy upravleniya gorno-transportnymi kompleksami [Modern systems of the mining transport systems management]. Saint Petersburg: Science, 2007. 306 p. (rus)

2. Tarazanov I.G. Itogi raboty ugolnoi promyshlennosti Rossii za janvar-dekabr 2017 goda [The results of the Russian coal industry in January-December 2017]. Coal. 2018. № 3. P. 58-73. (rus)

3. Voronov A.Y. Optimizatsiya pokazatelei ekspluatatsionnoi proizvoditelnosti ekskavatorno-avtomobilnykh kompleksov razrezov [Optimization of performance

indicators of the shovel-truck systems at open-pit mines]. PhD thesis. Kemerovo: KuzSTU, 2015. (rus)

4. Alarie S. Overview of solution strategies used in truck dispatching systems for open pit mines / S. Alarie, M. Gamache // International Journal of Surface Mining, Reclamation and Environment. 2002. № 16(1). P. 59-76.

5. Cetin N. Open-pit truck/shovel haulage system simulation. PhD thesis. Middle East Technical University, 2004.

6. Munirathinam M. A review of computer-based truck dispatching strategies for surface mining operations / M. Munirathinam, J.C. Yingling // International

Journal of Surface Mining, Reclamation and Environment. 1994. № 8(1). P. 1-15.

7. Afrapoli A.M. Mining fleet management systems: a review of models and algorithms / A.M. Afrapoli, H. Askari-Nasab // International Journal of Mining, Reclamation and Environment. 2017. P. 1-19.

8. Ataepour N. ARENA simulation model for truck-shovel operation in despatching and non-despatching modes / N. Ataepour, E.Y. Baafi // International Journal of Surface Mining, Reclamation and Environment. 1999. № 13(3). P. 125-129.

9. White J.W. On improving truck/shovels productivity on open pit mines / J.W. White, J.P. Olson, S.I. Vohnout // CIM Bulletin. 1993. № 86(973). P. 43-49.

10. Temeng V.A. Real-time truck dispatching using a transportation algorithm / V.A. Temeng, F.O. Otunoye, J.O. Frendewey // International Journal of Surface Mining, Reclamation and Environment. 1997. № 11(4). P. 203-207.

11. Law A.M., Kelton W.D. Imitatsionnoe modelirovanie [Simulation modeling analysis]. Saint Petersburg: Piter, 2004. 847 p. (rus)

12. Koryagin M.E. Optimalnoe upravlenie gruzopotokami pri tsiklicheskom snabzhenii dvuh potrebitelei [Optimal control of cargo flows with cyclic supply of two consumers] / M.E. Koryagin, V.A. Cherkmenyov // Vestnik of the Kuzbass State Technical University. 2003. № 1. P. 37-40. (rus)

13. Krause A.J. Shovel-truck cycle simulation methods in surface mining. MSc thesis. Johannesburg: University of the Witwatersrand, 2006.

14. Stout C.E. Simulation of a large multi-pit mining operation. MSc thesis. The University of Montana, 2011.

15. Vueykova O.N. Obosnovanie ratsionalnoi struktury avtomobilno-ekskavatornogo kompleksa otкрытого gornorudnogo kariera [Justification of the rational structure of the truck-shovel system at an open-pit ore mine]. Orenburg: SUrSU, 2013. (rus)

#### **Библиографическое описание статьи**

Воронов А.Ю., Воронов Ю.Е. Мультиуровневая модель управления экскаваторно-автомобильными комплексами разрезов // Горное оборудование и электромеханика – 2019. – № 5 (145). – С. 8-15.

#### **Reference to article**

Voronov A.Yu., Voronov Yu.E. Multistage model for shovel-truck system management at open-pit coal mines. Mining Equipment and Electromechanics, 2019, no. 5 (145), pp. 8-15.