

УДК 622:656

## ПОВЫШЕНИЕ КАЧЕСТВА УПРАВЛЕНИЯ ЭКСКАВАТОРНО-АВТОМОБИЛЬНЫМИ КОМПЛЕКСАМИ НА РАЗРЕЗАХ

Воронов А.Ю., к.т.н.  
Лапин Г.С., магистрант гр. АПм-161, II курс  
Воронов Ю. Е. д.т.н., профессор  
Кузбасский государственный технический университет  
имени Т.Ф. Горбачева  
г. Кемерово

Открытый способ разработки твердых полезных ископаемых является преобладающим во всем мире. Высокий удельный вес открытого способа объясняется его преимуществами перед подземным способом: более высокой производительностью труда, более низкой себестоимостью продукции, сокращенным сроком строительства предприятий [1]. В России удельный вес открытого способа в общем объеме добычи угля в настоящее время составляет около 72%, и имеется тенденция к его увеличению [2].

Вскрышные и добычные работы на разрезах выполняются преимущественно мощными экскаваторно-автомобильными комплексами (ЭАК). Одной из основных проблем существующих ЭАК является достаточно низкий уровень качества управления ими, в основном по причине неэффективной организации взаимодействия карьерных экскаваторов и автосамосвалов. 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.

Можно выделить следующие показатели качества управления ЭАК.

1. *Простои технологического оборудования*, выражаемые в единицах времени. Имеются в виду те простои, на которые можно повлиять с помощью рациональной организации работы ЭАК – такие, как простои оборудования в ожидании работы и по причине отказов оборудования.

2. Поскольку время простоя само по себе мало о чем говорит (очевидно, что значимость простоя различных единиц оборудования неодинакова), можно использовать *потери от простоев*, выражаемые в денежных единицах. Оценивается примерная стоимость 1 часа простоя каждого типа оборудования, которая умножается на фактическое время простоя.

Стоимость 1 часа простоя оборудования можно определить по следующей формуле:

$$C = \frac{P_{\text{ч}}}{k_{\text{вскр}}} \cdot C_{\text{у}}, \quad (1)$$

где  $P_{\text{ч}}$  – средняя часовая производительность единицы техники по вскрыше,  $\text{м}^3/\text{ч}$ ;  $k_{\text{вскр}}$  – плановый коэффициент вскрыши,  $\text{м}^3/\text{т}$ ;  $C_{\text{у}}$  – средняя стоимость угля при его реализации, руб./т.

Таким образом, потери от простоев представляют собой недополученную выгоду от реализации угля, условно не добытого по причине простоев оборудования.

3. *Степень использования оборудования*, напрямую зависящая от времени простоев. В качестве комплексного показателя качества управления ЭАК можно принять степень использования всего оборудования в составе ЭАК. Этот показатель после преобразований можно представить в следующем виде:

$$U_{\text{ЭАК}} = 1 - \frac{T_{\text{пр}}^{\text{э}} + T_{\text{пр}}^{\text{с}}}{T_{\text{см}}(N_{\text{э}} + N_{\text{с}})}, \quad (2)$$

где  $T_{\text{пр}}^{\text{э}}$ ,  $T_{\text{пр}}^{\text{с}}$  – простои соответственно экскаваторов и самосвалов в течение рабочей смены, ч;  $T_{\text{см}}$  – продолжительность смены, ч;  $N_{\text{э}}$ ,  $N_{\text{с}}$  – количество соответственно экскаваторов и самосвалов в составе ЭАК.

4. *Производительность ЭАК*, которую можно выразить количеством рейсов, выполняемых самосвалами в течение смены. Очевидно, что количество рейсов будет равно количеству погрузок, выполненных экскаваторами. Также очевидно, что чем меньше простои и выше степень использования оборудования, тем выше производительность.

Известны два основных способа организации работы карьерных ЭАК.

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).

Этот способ наименее эффективен, 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 сложно из-за влияния неконтролируемых факторов.

В настоящее время подавляющее большинство отечественных разрезов организуют работу своих ЭАК по закрытому циклу, что приводит к большим простоям самосвалов и экскаваторов в ожидании работы. К примеру, простои

в ожидании погрузки составляют до трети всех внутрисменных простоев самосвалов. Они возникают в основном по причине неорганизованной работы ЭАК, и при эффективном управлении их можно существенно сократить.

Для этого существует метод открытого цикла, при котором самосвал после разгрузки получает направление к свободному (или малозагруженному) экскаватору на основании выбранного 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.

Более рациональным представляется метод комбинированного цикла, при котором формируются «группы диспетчеризации» из конкретных экскаваторов и разгрузочных пунктов, которые будут работать вместе. Каждой из групп придается некоторое количество самосвалов, которые распределяются между пунктами погрузки по открытому циклу.

Непрерывное распределение карьерных самосвалов между экскаваторами (диспетчеризация) является динамическим процессом, требующим постоянного 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, – за счет принятия оптимальных диспетчерских решений, что сокращает простои и улучшает использование горного оборудования.

Проблема диспетчеризации в карьерных ЭАК заключается в том, что для каждого самосвала, покидающего зону разгрузки, нужно подобрать наиболее подходящий пункт погрузки. Обычно таким пунктом является тот, который в наибольшей степени удовлетворяет «критерию диспетчеризации» [3]. Могут использоваться самые различные критерии, и их общая цель – либо максимизировать производительность ЭАК, либо минимизировать простои техники при заданных условиях.

В целом, анализируя существующие методы диспетчеризации в карьерных ЭАК [3], можно отметить их общий недостаток: вероятностная природа технологических процессов либо не учитывается вообще, либо учитывается недостаточно. Процесс транспортирования горной массы корректнее всего описывается замкнутой (с неизменным числом заявок-самосвалов) сетью массового обслуживания, для которой получены аналитические формулы лишь при экспоненциальном распределении времени выполнения технологических операций [4]. Однако, как показали исследования, время выполнения операций ближе всего к гамма-распределению, что доказывает необходимость применения имитационного моделирования для решения диспетчерских задач.

Существует достаточно большое количество имитационных моделей, исследующих ЭАК карьеров. Анализируя имеющиеся модели [5], можно отметить, что большинство из них служат либо для наглядного представления процессов в ЭАК и их дальнейшего изучения, либо для простой оценки эффективности предлагаемых методов, тогда как для действительно эффективного управления необходимо результаты имитационного моделирования использовать в реальной работе ЭАК.

Предлагается модель диспетчеризации ЭАК, состоящая из двух уровней. На верхнем уровне формируются «группы диспетчеризации». В группы сводятся экскаваторы, работающие с одним и тем же типом горной массы, расположенные на одном и том же участке горных работ и способные обслуживаться самосвалами одного и того же типоразмера. В группах рекомендуется использовать однотипные самосвалы, так как это позволит свести к минимуму их простой в ожидании погрузки [6]. Также должно учитываться соотношение вместимостей кузовов самосвалов и ковшей экскаваторов.

Далее на верхнем уровне проводится первичная оптимизация управления ЭАК. Выполняется имитационное моделирование рабочей смены при работе ЭАК без закрепления самосвалов с выбранным критерием диспетчеризации. Каждому экскаватору и соответствующему ему маршруту транспортирования присваивается *параметр приоритетности* – положительное целое число, характеризующее значимость маршрута.

Критерий диспетчеризации можно описать следующей формулой:

$$J = \arg \min_j \frac{T_{\text{пр}j}^c + \delta}{x_j}, \quad (3)$$

где  $J$  – номер экскаватора, к которому нужно будет отправить самосвал;  $T_{\text{пр}j}^c$  – ожидаемый простой самосвала при его отправке к  $j$ -му экскаватору в составе группы диспетчеризации, ч;  $x_j$  – параметр приоритетности  $j$ -го экскаватора и соответствующего ему маршрута транспортирования;  $\delta$  – произвольное малое число, позволяющее в случае отсутствия простоев при возможности отправки самосвала на несколько направлений выбрать наиболее приоритетное.

Для сокращения суммарных простоев самосвалов и экскаваторов ожидаемый простой рассматриваемого самосвала при принятии 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 самосвалов в ожидании погрузки, а также уменьшить вероятность возникновения простоев экскаваторов.

В качестве критерия эффективности предлагаемого метода используется «минимум денежных потерь от простоев всех экскаваторов и всех самосвалов в рассматриваемой группе за смену». В результате расчетов на имитационной

модели для различного количества самосвалов, действующих в группе, выбирается набор параметров приоритетности, наилучшим образом удовлетворяющий критерию эффективности.

В дальнейшем параметры приоритетности используются на нижнем уровне для принятия диспетчерских решений в реальном времени. При значительном изменении в условиях работы (например, замене экскаватора) параметры переоцениваются.

В условиях разреза «Кедровский» была выделена одна группа диспетчеризации, соответствующая приведенным выше условиям. В нее вошли два экскаватора – Р&Н-2800 (объем ковша 33 м<sup>3</sup>) и ЭКГ-12ус (объем ковша 12,5 м<sup>3</sup>), работавшие на один отвал. Средние расстояния перевозки составили: 3,95 км для Р&Н-2800 и 4,2 км для ЭКГ-12ус. В группе использовались однотипные самосвалы БелАЗ-75306 грузоподъемностью 220 т.

Расчеты проводились для режимов работы ЭАК по закрытому и комбинированному циклам. Результаты показали, что комбинированный цикл дает значительную экономию по сравнению с закрытым – в основном за счет сокращения простоев самосвалов. При оптимальном количестве самосвалов сокращение потерь от простоев составило 12,6%, или 139 тыс. рублей за смену. Простой самосвалов сократился с 31,81 ч до 27,475 ч (13,6%), простои экскаваторов остались примерно на том же уровне (5,5 ч), степень использования оборудования повысилась с 0,814 до 0,835 (2,65%).

Комбинированный цикл дает выигрыш и в плане производительности. При 14 самосвалах в группе закрытый цикл позволяет перевезти только 50 800 т вскрыши, а комбинированный цикл – около 52 900 т, то есть на 4% больше. Поэтому, если норма выработки будет установлена на уровне не ниже 52 500 т за смену (что примерно соответствует реальной производительности экскаваторов в группе), то закрытый цикл потребует на один самосвал больше. Это говорит о том, что организация работы ЭАК по открытому или комбинированному циклу может дать экономию не только за счет сокращения простоев, но и за счет сокращения количества 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. Трубецкой К. Н. Современные системы управления горно-транспортными комплексами // К. Н. Трубецкой, А. А. Кулешов, А. Ф. Клебанов, Д. Я. Владимиров / под ред. акад. РАН К. Н. Трубецкого. – СПб.: Наука, 2007. – 306 с.
2. Таразанов И. Г. Итоги работы угольной промышленности России за январь-декабрь 2016 года // Уголь. – 2017. – №3. – С. 36-50.

3. 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.
4. 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.
5. Krause A. J. Shovel-truck cycle simulation methods in surface mining // M.Sc. Thesis, University of the Witwatersrand, South Africa. – 2006. – 123 p.
6. Вуейкова О. Н. Обоснование рациональной структуры автомобильно-экскаваторного комплекса открытого горнорудного карьера // Автореф. дисс. на соиск. уч. степ. канд. техн. наук. – Оренбург: Южно-Уральский государственный университет, 2013. – 15 с.