

## ТЕХНОЛОГИЯ ДОБЫЧИ ПОЛЕЗНЫХ ИСКОПАЕМЫХ

УДК 622.271.7.012.7

### РАЗРАБОТКА ДЕТАЛЬНОГО КОЭФФИЦИЕНТА СООТВЕТСТВИЯ И СРАВНЕНИЕ ЕГО ПРИМЕНИМОСТИ С АЛГОРИТМОМ МУРАВЬИНОЙ КОЛОНИИ

А. Даббах<sup>1</sup>, Р. Багхерпур<sup>2</sup>

*Исфаганский технологический университет,*  
E-mail: <sup>1</sup>a.dabbagh@mi.iut.ac.ir, <sup>2</sup>bagherpour@cc.iut.ac.ir, 8415683111, г. Исфаган, Иран

При открытой разработке месторождений определяется коэффициент соответствия парка машин, учитывающий число погрузочных и транспортных машин. Этот коэффициент помогает выявить число зависящих друг от друга машин. Для оптимизации работы парка оборудования разрабатывается новый параметр — детальный коэффициент соответствия. Выведены соотношения с целью управления производством и качеством работы. Для типового железорудного карьера смоделирован парк машин, проанализированный с помощью как детального коэффициента соответствия, так и алгоритма муравьиной колонии. Детальный коэффициент соответствия обеспечил повышение производительности на 10.6%, в то время как алгоритм муравьиной колонии повысил ее на 1%.

*Организация очереди, открытая разработка месторождения, отгрузка, алгоритм муравьиной колонии, детальный коэффициент соответствия*

DOI: 10.15372/FTPRPI20190107

Основными характеристиками горной промышленности являются высокая степень риска и высокие капитальные вложения. Основная задача горной промышленности — извлечение минералов с минимальными затратами и максимально возможной прибылью. Открытые горные работы — основной метод добычи в мире, которыми разрабатывается ~90% месторождений [1]. Технология добычи включает в себя такие операции, как бурение, взрывные работы, погрузка и транспортировка. Они выполняются и совершенствуются в зависимости от существующих условий [2]. На макроуровне оценка совокупных затрат на погрузку и вывоз — весьма сложная задача. При открытых горных работах погрузка и вывоз являются наиболее высокозатратными составляющими технологии добычи, поэтому оптимизация парка машин является актуальной задачей [3].

На рис. 1 показана модель отгрузки руды самосвалами на карьере. На карьере самосвалы выходят на заданную точку, где запрашивается маршрут после каждого рабочего цикла. Самосвалы должны работать с экскаватором с высоким коэффициентом загрузки.

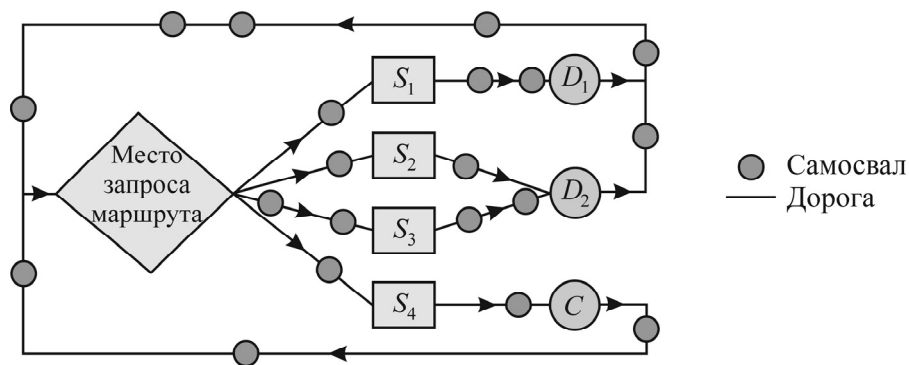


Рис. 1. Модель движения самосвалов по карьеру с экскаваторами  $S_1$ – $S_4$ , отвалами  $D_1$ ,  $D_2$  и дробилкой  $C$

Соотношение между погрузочными и транспортными машинами определяется коэффициентом соответствия. Коэффициент соответствия — фактическая скорость достижения грузовиком скорости обслуживания погрузчика [4]. Данный коэффициент подразумевает, что средняя производительность машин и эффективность каждой транспортирующей машины не рассчитываются по отдельности. По величине коэффициента невозможно назначить необходимое число самосвалов к каждому погрузчику. Для применения коэффициента соответствия в настоящей работе введен другой параметр — детальный коэффициент соответствия. Этот новый коэффициент может использоваться для оптимального движения самосвалов к погрузчикам. С целью анализа применимости детального коэффициента соответствия в оптимизации системы движения самосвалов рассмотрен железорудный карьер, расположенный в центральной части Ирана. В начале были собраны и обработаны требуемые статистические данные. Функция отгрузки руды относится к циклам загрузки. Выявлены детальные параметры погрузочных циклов. Детальный коэффициент соответствия рассчитывался для каждого погрузчика. Проведена оптимизация, основанная на модели, учитывающей детальный коэффициент соответствия и минимальную вероятность холостой работы погрузчика.

Алгоритм муравьиной колонии (АМК) — один из эвристических методов оптимизации парка машин. Рассматриваемая проблема решалась с помощью данного алгоритма. Результаты решения сравнивались с решением, полученным с помощью минимальной вероятности холостой работы (детальный коэффициент соответствия) погрузчика и фактических условий карьера.

#### ОБЩИЕ ПОЛОЖЕНИЯ ОБ ОПТИМИЗАЦИИ ТРАНСПОРТИРОВКИ НА ОТКРЫТЫХ МЕСТОРОЖДЕНИЯХ

Коэффициент соответствия может использоваться для соответствия частоты приезда самосвала с интенсивностью погрузки [4]. Эта величина зависит от грузоподъемности машин и времени циклов загрузки и транспортировки. Если коэффициент равен 1, то вероятность холостой работы машин равна 0. Если он меньше 1, то существует вероятность холостой работы погрузчика; если он больше 1, то существует вероятность холостой работы самосвалов. В табл. 1 представлены соотношения, принятые для расчета коэффициента соответствия.

В 2008 г. С. Н. Берг предложил наиболее известные отношения коэффициента соответствия [4]. Преимущества этих отношений: простота метода; метод может применяться как к однородному, так и неоднородному парку машин; среднее время ожидания для погрузочных и транспортирующих машин может быть приблизительно спрогнозировано. Недостатки: производительность отдельного погрузчика не может быть определена; самосвалы не могут быть точно назначены к погрузчикам; невозможность управления производственной мощностью карьера.

ТАБЛИЦА 1. Отношения, принятые для расчета коэффициента соответствия

| Авторы, источник      | Отношение                                                                                                                                                                                     | Пояснение                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                        |
|-----------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Дуглас [5]            | $M_b = \frac{P'_i}{P_i}$                                                                                                                                                                      | $M_b$ — количество самосвалов, необходимых для каждого погрузчика;<br>$P'_i$ — производительность погрузчика;<br>$P_i$ — тяговая мощность самосвала                                                                                                                                                                                                                                                                                              |
| Морган и Петерсон [6] | $MF_{i,i'} = \frac{t_{i,i'} x_i}{\bar{t}_x y_{i'}}$                                                                                                                                           | $x_i$ — количество самосвалов типа $i$ ;<br>$y_{i'}$ — количество загрузочных машин типа $i'$ ;<br>$t_{i,i'}$ — время загрузки самосвала типа $i$ погрузчика типа $i'$ ;<br>$\bar{t}_x$ — средняя продолжительность цикла самосвалов без учета времени ожидания;<br>$MF_{i,i'}$ — коэффициент соответствия для однородных парков погрузчиков и транспорта                                                                                        |
| Берт [4]              | $MF_i = \frac{\sum_i t_{i,i'} x_i}{\bar{t}_x x_{i'}}$<br>$MF_i = \frac{x_i}{t_i \sum_{i'} \frac{x_{i'}}{t_{i,i'}}}$<br>$MF = \left( \bar{t}_x \sum_{i'} \frac{x_{i'}}{t_{i,i'}} \right)^{-1}$ | $x_{i'}$ — число погрузочных машин $i'$ ;<br>$MF_i$ — коэффициент соответствия для неоднородных и однородных грузовых автопарков;<br>$t_i$ — продолжительность цикла самосвала типа $i$ ;<br>$MF_i$ — коэффициент соответствия для неоднородного парка самосвалов и однородного парка погрузчиков;<br>$t_{i'}$ — время загрузки самосвала погрузчиком типа $i$ ;<br>$MF$ — коэффициент соответствия для абсолютно неоднородного парка самосвалов |

В [7] показано, что производственная деятельность с низким коэффициентом соответствия неэффективна. Похожий анализ можно сделать для любого карьера. В [8] представлен простой эвристический метод оценки размера парка транспортирующих машин. Его соотношение выглядит как

$$N = \frac{C}{L}, \quad (1)$$

где  $N$  — количество самосвалов;  $C$  — время, необходимое для полного выполнения цикла по загрузке и транспортировке;  $L$  — время загрузки самосвала.

Для оптимизации предлагаются различные методы. Основная их часть базируется на линейном программировании. В [9], используя целочисленное линейное программирование, минимизирована вероятность холостой работы самосвала. Предложены две модели: одна — для однородного парка машин, в которой для каждого погрузчика назначались одинаковые самосвалы, другая — для практически неоднородного. В [10] разработана модель привязки самосвалов к погрузочному оборудованию (экскаватор или погрузчик). Эта модель основана на линейных ограничениях на объемы отгружаемой руды или пустой породы. В данном подходе проблема состоит в привязке самосвалов к погрузчику и во времени их простоя. Для сокращения производственных затрат в [11] предложено решение, основанное на целочисленном линейном программировании (ЦЛП), чтобы оптимизировать количество погрузочных операций, которые выполняются на пути от забоя до места выгрузки руды. В этой модели оптимизируется только количество групп самосвалов, а не самосвалы, назначаемые к экскаватору. Методика оптимального движения самосвалов не рассматривается. Двухстадийная модель повышения

производительности, использующая ЦЛП, предложена в [12]. Стадия 1 заключается в привязке самосвала к экскаватору в момент времени  $t = 0$  (начало работ). На стадии 2 оптимизируется движение самосвалов для экскаваторов при  $t > 0$  (время между первой загрузкой и концом смены). Тем не менее эти решения не были смоделированы для реального карьера.

Дополнительно к моделированию, основанному на ЦЛП, для оптимизации парка машин на открытых месторождениях проводились исследования, базирующиеся на теории очереди и симуляции. В [13], используя процесс принятия решений Маркова, оптимизирована непрерывная привязка самосвалов к погрузчикам при неоднородном парке [13]. Когда количество неоднородных погрузчиков превышает 2 единицы, то проблема становится весьма сложной для решения. В [14] проведена оптимизация в две стадии. Решение на первой стадии заключалось в определении оптимального маршрута между местом загрузки и местом разгрузки в соответствии с теорией очередей. Чтобы сократить общее число самосвалов на маршруте, на второй стадии проводилась оптимизация на основе ЦЛП. Исследования осуществлялись на угольном разрезе “Орханели” с неоднородным парком машин. Проведя полевые опросы на угольном разрезе “Оптимум Коллери”, была предложена модель оценки размера парка самосвалов и получены данные по движению самосвалов, основанные на циклах загрузки и транспортировки [15]. Моделирование проводилось с помощью ПО “Arena”®. Объем транспортных работ парка машин при открытой разработке месторождения моделировали на протяжении четырех недель [16]. Разница средней производительности между фактическими и смоделированными данными составила 2.5 %.

В [17] разработано несколько моделей для нахождения наиболее оптимального соотношения погрузочных и транспортных машин в карьере, занимающихся поставкой строительных материалов в Южную Корею. Для принятия решения при моделировании установлены подходящие размещения рабочих забоев и соотношения машин. В [18] определена сравнительная пропускная способность самосвала в зависимости от экскаватора и диспетчерской системы с использованием модели фиксированного назначения на медном руднике Sungun. Результаты моделирования показали снижение времени ожидания самосвалов на 7.8 % по сравнению с предыдущей системой фиксированного распределения Ортиз и др. Хороший результат получен методом проб и ошибок для парка машин, используемых при разработке месторождений [19]. Моделировали различные варианты соотношения самосвалов и погрузчиков в ПО “Arena”®.

Исследования основаны преимущественно на целочисленном программировании, теории массового обслуживания и моделировании. В большинстве исследований, рассматривающих неоднородный парк машин, функции нелинейны [4, 9], рабочие условия меняются из-за отказов оборудования во время работы. Поэтому линейное программирование, основанное на постоянных условиях, приводит к проблемам. Теория очереди и моделирование транспортных операций в системе движения самосвалов в карьере может подтвердить ту или иную теорию. Далее покажем, что использование детального коэффициента соответствия в теории очередей является оптимальным решением для движения самосвалов, составляющих неоднородные парки машин.

#### РАЗРАБОТКА КОЭФФИЦИЕНТА СООТВЕТСТВИЯ

Основное преимущество коэффициента соответствия заключается в гибкости соотношений при различных условиях горнодобывающей деятельности. Эти соотношения могут быть применены, когда имеются различия в оборудовании и в точках загрузки и выгрузки. Предполагается, что в среднем погрузчикам требуется ожидать транспорт, и наоборот.

Использование вышеупомянутых методов может не решить проблему в полной мере, поэтому необходимо внести изменения в соотношения. В данной работе разрабатывается другой коэффициент для каждого погрузчика в отдельности. Он носит название детальный коэффициент соответствия (ДКС).

Если коэффициент соответствия карьера примерно равен 1, то соответственно выбирают погрузочные и транспортирующие машины и их грузоподъемность. Эти машины могут работать на пике своей грузоподъемности. Если на карьере присутствует более одного погрузчика, то движение самосвалов выглядит следующим образом. Сначала некоторые самосвалы должны быть привязаны к обоим погрузчикам. В этом случае ДКС считается для каждого погрузчика отдельно. Предпринята попытка уменьшить количество транспортных средств от погрузчиков, когда ДКС превышает 1, и увеличить число самосвалов, когда ДКС меньше 1. Такие действия выполняются, чтобы привести данный коэффициент как можно ближе к 1 для всех транспортирующих машин, сократив время ожидания. Если ДКС всех погрузчиков меньше 1, то транспортная работа самосвалов снижается без прерывания производственной деятельности. В последующих разделах рассматривается детальный коэффициент соответствия для двух режимов: однородного и неоднородного парка транспортирующих машин. Так как ДКС рассчитывается для отдельного погрузчика и его грузовая производительность в рабочем забое не меняется, то нет необходимости разрабатывать ДКС для неоднородного парка погрузчиков.

#### ДКС ДЛЯ ОДНОРОДНОГО ПАРКА ТРАНСПОРТИРУЮЩИХ МАШИН

Частота приезда самосвалов  $A_j$  определяется как  $x_i / t_i$  ( $x_i$  — количество самосвалов  $i$ -го типа;  $t_i$  — время цикла движения самосвала типа  $i$ ). Количество самосвалов  $i$ -го типа, которые нагружаются  $j$ -м погрузчиком за единицу времени, равняется  $1/t_{i,j}$  ( $t_{i,j}$  — время полной погрузки самосвала  $i$ -го типа  $j$ -м погрузчиком). Так как параметры погрузчика влияют на ДКС, интенсивность погрузки  $D_j$  определяется как  $1/t_{i,j}$ . ДКС  $MF_{D_j}$  для  $j$ -го погрузчика запишется

$$MF_{D_j} = \frac{A_j}{D_j} = \frac{\frac{x_i}{t_i}}{\frac{1}{t_{i,j}}} = \frac{x_i t_{i,j}}{t_i}. \quad (2)$$

#### ДКС ДЛЯ НЕОДНОРОДНОГО ПАРКА ТРАНСПОРТИРУЮЩИХ МАШИН

В неоднородных парках машин частота приезда самосвалов  $A$  равна отношению количества самосвалов к среднему времени цикла самосвала:

$$A = \frac{\sum_i x_i}{\bar{t}_x}, \quad (3)$$

где  $\bar{t}_x$  — среднее время цикла самосвалов, обслуживающих  $j$ -й погрузчик [4].

Интенсивность погрузки  $D_{i'}$  для  $j$ -го погрузчика рассчитывается по формуле

$$D_{i'} = \frac{\sum_i x_i}{\sum_i (t_{i,j} x_i)}. \quad (4)$$

ДКС для неоднородного парка машин определяется отношением (3) к (4):

$$MF'_{D_j} = \frac{A}{D_i} = \frac{\sum (t_{i,j} x_i)}{\bar{t}_x}. \quad (5)$$

### КАЧЕСТВЕННАЯ И КОЛИЧЕСТВЕННАЯ ОЦЕНКА ДОБЫТОЙ ПРОДУКЦИИ

Детальный коэффициент соответствия может применяться для оценки объема и качества добытых минералов. Рассматривается объем добычи за 1 ч работы погрузчика  $m_j$ . Если ДКС больше или равен 1, то объем нагружаемой погрузчиком породы равен  $m_j$ . Если же ДКС меньше 1, ожидаемый объем добычи погрузчиком определяется формулой

$$m_{ij} = m_j MF_{D_j}, \quad (6)$$

где  $m_{ij}$  — количество породы, загружаемой  $j$ -м погрузчиком.

Для качественной оценки минералов примем, что минералы загружаются из  $n$  забоев. В этом случае, если ДКС меньше, равен или больше 1, то средний объем погрузки в самосвал определяется как

$$\bar{g} = \sum_{j=1}^n \frac{m_{ij} MF_{D_j} g_j}{m_{ij} MF_{D_j}}, \quad \text{ДКС} \leq 1, \quad (7)$$

$$\bar{g} = 1 \sum_{j=1}^n \frac{m_j g_j}{m_j}, \quad \text{ДКС} > 1. \quad (8)$$

Здесь  $\bar{g}$  — средний объем погрузки;  $g_j$  — доля полученной горной массы от  $j$ -го погрузчика. В (6) и (7)  $MF_{D_j}$  уместно заменить на  $MF'_{D_j}$ .

### АЛГОРИТМ МУРАВЬИНОЙ КОЛОНИИ

В добавление к ДКС в системах движения самосвалов может быть использован алгоритм муравьиной колонии (АМК). В [20] разработали АМК, взяв за аналог собирательное поведение муравьев. В природе муравьи свободно передвигаются и после того, как они нашли пищу, возвращаются в свою колонию, прокладывая химические тропы, помечаемые феромонами. Другие муравьи всегда выбирают путь с наибольшим содержанием феромона.

Вероятность того, что муравей выполнит поставленную задачу, определяется с использованием уравнения

$$R_{ij}(t) = \frac{S_i^n(t)}{S_i^n(t) + \theta_{ij}^m(t)}, \quad (9)$$

где  $S_i(t)$  — интенсивность побуждения  $i$ -й задачей за время  $t$ ;  $\theta_{ij}(t)$  — функция предельного уровня  $j$ -го муравья в рамках  $i$ -й задачи за время  $t$ ;  $n$  — фактор чувствительности [21].

Формула (9) разработана для использования в системах движения на карьерах:

$$S_i(t) = \frac{p_j(t)([V_i^e(t) - V_i(t)])}{f(n_i(t), C)}, \quad (10)$$

где  $V_i^e(t)$  — совокупный объем породы, предназначенный для разработки  $i$ -м экскаватором за время  $t$ ;  $V_i(t)$  — фактический суммарный объем породы, который разработан  $i$ -м экскаватором за время  $t$ ;  $n_i(t)$  — количество самосвалов в очереди к  $i$ -му экскаватору во время  $t$ ;  $C$  — грузоподъемность самосвалов в очереди к  $i$ -му экскаватору;  $p_j(t)$  — предпочтение для материалов разработки  $i$ -м экскаватором.

Функция  $f(n_i(t), C)$  всегда строго положительна и определяется как

$$f(n_i(t), C) = n_i(t)C + \varepsilon, \quad 0 < \varepsilon \ll 1. \quad (11)$$

Значение побуждения, полученное по (10), показывает размер добычи в каждом блоке. Чтобы рассмотреть динамику модели, ее необходимо модернизировать, используя выражение

$$S_i(t + \Delta t) = S_i(t) + \psi(t). \quad (12)$$

Здесь  $\psi(t)$  — функция обновления. Цель данной функции — достижение устойчивости движения в процессе работы. Например, после определенного временного интервала, если самосвал отправляется к экскаватору, функция  $\psi(t)$  уменьшает интенсивность побуждения, чтобы облегчить условия привязки данного самосвала к другим экскаваторам. Если ни один самосвал не отправляется к экскаватору, то функция обновления увеличит интенсивность побуждения чтобы направить самосвал к экскаватору. Функция предельного уровня, согласно [21], может быть выражена

$$\theta_{ij}(t) = e^{\left[ \frac{d_{ij}(t)}{\sum_k d_{ik}(t)} \right]^{\varepsilon_j(t)}}, \quad (13)$$

где  $\varepsilon_j(t)$  — состояние загрузки самосвала в момент  $t = 1$ , если самосвал заполнен, и  $t = -1$ , если самосвал пустой;  $d_{ij}(t)$  — расстояние  $j$ -го самосвала до  $i$ -го экскаватора в момент времени  $t$ .

В соответствии с предыдущими работами, фактор чувствительности принимается  $n = 2$  [21].

Приведенные формулы подтверждены реальным примером. Из-за следующих причин эти выражения подверглись некоторым изменениям. Принимая во внимание, что погрузчик отстает от графика,  $S_i(t)$  увеличивается в соответствии с (10), и вероятность того, что самосвал направится к погрузчику, увеличивается. Нельзя утверждать, что самосвал отправится к погрузчику с большей грузоподъемностью. Для пустого самосвала количество  $\theta_{ij}(t)$  в ряде случаев неэффективно в пределах  $S_i(t)$ . Этой величиной пренебрегают. Другими словами, повышение или снижение числа самосвалов, привязанных к погрузчику, работающему в соответствии с требованиями производительности, имеет более значительный эффект, нежели расстояние движения самосвала от точки погрузки. В условиях карьера расстояние между самосвалом и погрузчиком более известно, чем фактическая грузоподъемность самосвала. Формула (10) изменяется следующим образом:

$$S_i(t) = \frac{p_j(t)([N_i^m(t) - N_i(t)])}{f(n_i(t), C)}, \quad (14)$$

$N_i^m(t)$  — максимальная пропускная способность самосвалов для погрузчика или максимальное число привязанных к  $i$ -му погрузчику в момент времени  $t$ , необходимых для требуемой производительности;  $N_i(t)$  — количество самосвалов, привязанных к  $i$ -му погрузчику в момент  $t$ ;  $n_i(t)$  — количество самосвалов, находящихся в очереди к  $i$ -му погрузчику в момент  $t$ .

Формула (14) ограничена по применению. Функция, в которой отсутствует вероятность одновременного случая двух событий, называется экспоненциальной [22]. Однако функции диспетчеризации времени цикла загрузки и перевозки могут не быть экспоненциальными. Это означает, что существует возможность того, что более одного самосвала могут в определенный момент времени запросить данный маршрут. В такой ситуации формула (14) не работает, поскольку вероятность ответа самосвала становится больше 1. Для решения этой проблемы используется условие

$$N_i^m(t) \geq N_i(t). \quad (15)$$

#### ПРАКТИЧЕСКИЙ ПРИМЕР ПРИМЕНЕНИЯ.

##### ЖЕЛЕЗОРУДНЫЙ КАРЬЕР, РАСПОЛОЖЕННЫЙ В ЦЕНТРАЛЬНОЙ ЧАСТИ ИРАНА

Для сравнения возможностей ДКС и АМК по оптимизации системы движения самосвалов на открытых месторождениях в качестве примера выбран парк машин железорудного карьера, расположенного в центральной части Ирана. Годовое производство железной руды на карьере составляет 4 млн т с коэффициентом вскрыши 1.0–1.6. В табл. 2, 3 представлены характеристики парка машин и маршруты транспортирования.

ТАБЛИЦА 2. Характеристика парка машин на исследуемом карьере

| Погрузочная техника        | Количество | Номинальная грузоподъемность |
|----------------------------|------------|------------------------------|
| Погрузчик Komatsu W470     | 3          | 4.2 м <sup>3</sup>           |
| Экскаватор Komatsu PC 400  | 1          | 2.2 м <sup>3</sup>           |
| Экскаватор Komatsu PC 800  | 3          | 3.4 м <sup>3</sup>           |
| Экскаватор Komatsu PC 1250 | 1          | 4.5 м <sup>3</sup>           |
| Самосвал HD 325            | 23         | 35.0 т                       |
| Самосвал HD 465            | 4          | 50.0 т                       |

ТАБЛИЦА 3. Характеристика маршрута транспортировки на исследуемом карьере

| Место погрузки<br>(абсолютная высота, м)         | Погрузочная техника    | Техника  | Место выгрузки                              | Расстояние до места выгрузки, м |
|--------------------------------------------------|------------------------|----------|---------------------------------------------|---------------------------------|
| Вскрышной забой (1068.5)                         | Погрузчик Komatsu W470 | L8       | Отвал SE                                    | 4 680                           |
| Рудный забой (919.0)                             | Экскаватор PC 1250     | B-7-1250 | Дробилка или железорудный отвал             | 583 + 3 393                     |
| Вскрышной забой (979.0)                          | Экскаватор PC 470      | L4       | Отвал                                       | 4 460                           |
| Вскрышной забой (979.0)                          | Экскаватор PC800       | B6       | >>                                          | 4 265                           |
| Вскрышной забой (991.0)                          | Экскаватор PC400       | B11      | >>                                          | 4 066                           |
| Вскрышной забой (1006.0)                         | Погрузчик Komatsu W470 | L5       | >>                                          | 3 905                           |
| Забой руды с высоким содержанием фосфора (928.5) | Экскаватор PC800       | B-7-800  | Дробилка руды с высоким содержанием фосфора | 3 727                           |
| Забой руды с высоким содержанием фосфора (928.5) | Экскаватор PC800       | B806     | Отвал руды с высоким содержанием фосфора    | 3 586                           |

Ввиду того что погрузчики работают с самосвалами грузоподъемностью как 35, так и 50 т, время погрузочного цикла измерялось отдельно для самосвалов каждого типа. В табл. 4 представлены результаты измерения времени циклов и функции распределения.

ТАБЛИЦА 4. Функция распределения времени циклов, с

| Техника  | Грузоподъемность самосвала, т | Функция распределения         | Среднее время | Минимум | Максимум | Стандартное отклонение |
|----------|-------------------------------|-------------------------------|---------------|---------|----------|------------------------|
| L8       | 35                            | Нормальное                    | 127           | 63      | 211      | 29.7                   |
|          | 50                            | >>                            | 182           | 106     | 302      | 42.8                   |
| B-7-1250 | 35                            | Бета (1.95 и 2.02)            | 130           | 91      | 167      | 17.3                   |
|          | 50                            | Бета (1.65 и 3.38)            | 182           | 76      | 233      | 30.0                   |
| L4       | 35                            | Нормальное                    | 134           | 68      | 214      | 29.7                   |
|          | 50                            | >>                            | 185           | 69      | 262      | 46.2                   |
| B6       | 35                            | Эрланга (2.00 и 23.7)         | 106           | 59      | 234      | 32.0                   |
|          | 50                            | Вейбула (1.27 и 37.7)         | 154           | 84      | 335      | 48.8                   |
| B11      | 35                            | Нормальное                    | 130           | 73      | 243      | 27.3                   |
|          | 50                            | Треугольное                   | 165           | 104     | 307      | 38.9                   |
| L5       | 35                            | Вейбула (2.22 и 58.0)         | 144           | 92      | 219      | 23.6                   |
|          | 50                            | Треугольное                   | 189           | 132     | 293      | 32.8                   |
| B-7-800  | 35                            | Логарифмическое (25.9 и 27.8) | 84.7          | 59      | 153      | 17.8                   |
|          | 50                            | Бета (2.75 и 0.951)           | 123           | 84      | 236      | 30.6                   |
| B806     | 35                            | Нормальное                    | 74.4          | 37      | 136      | 13.5                   |
|          | 50                            | >>                            | 109           | 67      | 184      | 19.5                   |

Скорости загруженных и порожних самосвалов измерялись на различных участках карьера. В данном карьере загруженные самосвалы двигались в сторону повышения абсолютной высоты, а порожние — в сторону снижения. В табл. 5 приведены характеристики функции распределения скорости. Скорость самосвала не зависит от его номинальной грузоподъемности, но зависит от загруженности самосвала и от дорожных условий (подъем или спуск).

ТАБЛИЦА 5. Функция распределения скорости самосвала, м/с

| Условия                                  | Функция распределения | Минимум | Средняя скорость | Максимум | Стандартное отклонение |
|------------------------------------------|-----------------------|---------|------------------|----------|------------------------|
| Порожний самосвал, движение на спуск     | Гамма (7.29 и 0.699)  | 8.71    | 13.10            | 19.0     | 1.30                   |
| Загруженный самосвал, движение на подъем | Гамма (7.49 и 0.490)  | 6.66    | 9.66             | 14.3     | 1.34                   |

Самосвал разгружает породу в дробилку или на отвал. При разгрузке в дробилку время подчиняется функции бета-распределения, а при разгрузке на отвал — распределению Вейбула. В табл. 6 представлены характеристики функции распределения времени разгрузки. После определения расстояний маршрутов и их разделения по скоростям, упомянутых в табл. 5, на основании табл. 7 получена функция распределения времени движения по маршруту.

ТАБЛИЦА 6. Функция распределения времени разгрузки, с

| Место разгрузки | Функция распределения | Минимум | Максимум | Среднее время | Стандартное отклонение |
|-----------------|-----------------------|---------|----------|---------------|------------------------|
| Дробилка        | Бета (3.10 и 2.94)    | 44      | 63       | 53.2          | 3.77                   |
| Отвал           | Вейбула (2.75 и 8.64) | 41      | 56       | 48.2          | 3.00                   |

ТАБЛИЦА 7. Функция распределения времени движения самосвалов по карьере

| Начало маршрута        | Конец маршрута         | Расстояние, м | Загрузка самосвала | Функция распределения | Среднее время, с | Стандартное отклонение |
|------------------------|------------------------|---------------|--------------------|-----------------------|------------------|------------------------|
| Место базирования      | Точка запроса маршрута | 1250          | Порожний           | Нормальное            | 94.7             | 13.2                   |
| Точка запроса маршрута | L8                     | 3435          | >>                 | >>                    | 268              | 36.3                   |
| Точка запроса маршрута | B806                   | 2209          | >>                 | >>                    | 172              | 23.4                   |
| Точка запроса маршрута | L5                     | 2592          | >>                 | >>                    | 202              | 27.4                   |
| Точка запроса маршрута | L4                     | 3147          | >>                 | >>                    | 245              | 33.3                   |
| Точка запроса маршрута | B-7-1250               | 2184          | >>                 | >>                    | 167              | 22.7                   |
| Точка запроса маршрута | B11                    | 2698          | >>                 | >>                    | 210              | 28.5                   |
| Точка запроса маршрута | B6                     | 2592          | >>                 | >>                    | 202              | 27.4                   |
| Точка запроса маршрута | B-7-800                | 2341          | >>                 | >>                    | 182              | 24.8                   |
| L8                     | Отвал SE               | 4680          | Груженный          | >>                    | 493              | 64.7                   |
| B806                   | Отвал P2O5             | 3586          | >>                 | >>                    | 378              | 49.6                   |
| L5                     | Вскрышной отвал        | 3905          | >>                 | >>                    | 411              | 54.0                   |
| L4                     | То же                  | 4460          | >>                 | >>                    | 470              | 61.7                   |
| B-7-1250               | Основная дробилка      | 3393          | >>                 | >>                    | 357              | 46.9                   |
| B11                    | Вскрышной отвал        | 4011          | >>                 | >>                    | 423              | 55.4                   |
| B6                     | То же                  | 4265          | >>                 | >>                    | 449              | 59.0                   |
| B-7-800                | Дробилка P2O5          | 3727          | >>                 | >>                    | 393              | 51.5                   |
| Основная дробилка      | Железорудный отвал     | 583           | >>                 | >>                    | 61.4             | 8.06                   |
| Железорудный отвал     | Основная дробилка      | 583           | Порожний           | >>                    | 45.4             | 6.17                   |
| Отвал SE               | Точка запроса маршрута | 2159          | >>                 | >>                    | 168              | 22.8                   |
| Отвал P2O5             | То же                  | 1307          | >>                 | >>                    | 102              | 13.8                   |
| Вскрышной отвал        | >>                     | 1313          | >>                 | >>                    | 102              | 13.9                   |
| Основная дробилка      | >>                     | 1245          | >>                 | >>                    | 97               | 13.2                   |
| Дробилка P2O5          | >>                     | 1386          | >>                 | >>                    | 108              | 14.7                   |

При выработке руды или вскрыши необходимо расставить приоритет погрузочных участков, исходя из условий на карьере. Ниже представлены приоритеты погрузки породы:

|                     |          |         |      |    |    |    |    |     |
|---------------------|----------|---------|------|----|----|----|----|-----|
| Приоритет           | 1        | 2       | 3    | 4  | 5  | 6  | 7  | 8   |
| Погрузочная техника | B-7-1250 | B-7-800 | B806 | L8 | B6 | B5 | B4 | B11 |

После расстановки приоритетов погрузочной техники на основе детального коэффициента соответствия и АМК разработаны две модели. В рамках детального коэффициента соответствия для оценки тоннажа руды для погрузчиков В-7-1250, В-7-800 и В-806 используется формула (6), а для оценки тоннажа руды в рамках АМК — ограничение максимального числа погрузок самосвала. В обоих моделях установлен интервал времени 30 мин для организации транспортной деятельности.

Если происходит любое из нижеперечисленных событий, то используется функция обновления для их оперативной корректировки:

- начало загрузки по крайней мере одного самосвала;
- окончание загрузки по крайней мере одного самосвала;
- прибытие по крайней мере одного самосвала на точку запроса маршрута;
- по крайней мере один самосвал находится в очереди.

В табл. 8 представлены результаты работы моделей в карьере с фактическими значениями производительности. Видно, что оптимизация на основе ДКС помогла повысить производительность на 10.6 %, АМК повысил производительность лишь на 1 %. Таким образом, детальный коэффициент соответствия предпочтительнее АМК.

ТАБЛИЦА 8. Сравнение влияния детального коэффициента соответствия и алгоритма муравьиной колонии на фактическую производительность железорудного карьера

| Техника                                          | Нормальная<br>производительность<br>карьера |                  | Оптимизация<br>на основе детального<br>коэффициента соответствия |                  | Оптимизация<br>на основе АМК |                  |
|--------------------------------------------------|---------------------------------------------|------------------|------------------------------------------------------------------|------------------|------------------------------|------------------|
|                                                  | Самосвал<br>35 т                            | Самосвал<br>50 т | Самосвал<br>35 т                                                 | Самосвал<br>50 т | Самосвал<br>35 т             | Самосвал<br>50 т |
| L8                                               | 9                                           | 2                | 11                                                               | 3                | 8                            | 0                |
| В-7-1250                                         | 9                                           | 5                | 11                                                               | 5                | 5                            | 9                |
| L4                                               | 11                                          | 3                | 9                                                                | 3                | 6                            | 4                |
| В6                                               | 10                                          | 4                | 17                                                               | 1                | 9                            | 0                |
| В11                                              | 8                                           | 2                | 12                                                               | 0                | 10                           | 0                |
| L5                                               | 12                                          | 0                | 13                                                               | 0                | 19                           | 0                |
| В-7-800                                          | 11                                          | 0                | 12                                                               | 1                | 19                           | 2                |
| В806                                             | 15                                          | 0                | 10                                                               | 4                | 10                           | 1                |
| Итого                                            | 85                                          | 16               | 95                                                               | 17               | 86                           | 16               |
| Процент относительной<br>загрузки, %             | 100                                         | 100              | 112                                                              | 106              | 101                          | 100              |
| Относительное повышение<br>производительности, % | —                                           |                  | 10.6                                                             |                  | 1                            |                  |

Примечание. Числа обозначают количество загруженных самосвалов за 1 ч работы

На рис. 2 представлен объем добытой руды и пустой породы соответственно. Сравнение двух методов оптимизации по объему добычи показывает, что оптимизация с использованием детального коэффициента соответствия повысила производительность добычи руды на 180 т/ч, а выемку вскрыши на 170 т/ч. АМК повысил добычу руды на 315 т/ч, но выемка вскрыши сократилась на 280 т/ч. ДКС позволяет более эффективно использовать ресурсы для повышения производительности.

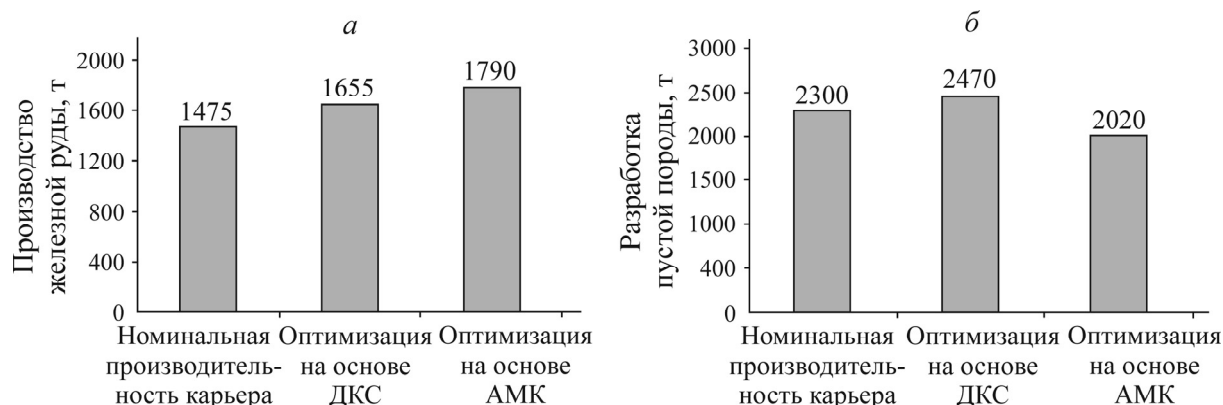


Рис. 2. Количество добытой железной руды (а) и разработанной пустой породы (б) за 1 ч работы

## ВЫВОДЫ

Системы погрузки и транспортировки играют важную роль при открытой разработке месторождений. Для управления производительностью горнодобывающей техники необходимо оценить производственную мощность каждой машины. Используется и улучшается коэффициент соответствия погрузочных и транспортирующих машин. Потери эффективности таких машин не всегда заметны, так как парк машин характеризуется одним общим соотношением. Для решения данной проблемы введен детальный коэффициент соответствия. Расчет данного коэффициента показывает преимущества и недостатки парка машин, включающего один погрузчик и несколько самосвалов.

Алгоритм муравьиной колонии, применяемый к системе движения на открытом месторождении, использует феромон, определяемый потребностью погрузчика в самосвалах и расстоянием между самосвалом и погрузчиком. При этом не рассматривается вероятность холостой работы машин. Метод может оказаться неэффективным из-за холостой работы машины. Тогда по алгоритму муравьиной колонии к погрузчику может отправиться неоптимальное количество самосвалов.

Основой детального коэффициента соответствия является вероятность холостой работы машин. Данный коэффициент стремится уменьшить эту вероятность. Если он меньше единицы, то существует вероятность холостой работы погрузчика, а если больше единицы — вероятность холостой работы самосвала. Если детальный коэффициент соответствия парка машин стремится к единице, вероятность холостой работы машин минимальна, что ведет к повышению продуктивности и оптимизации добычи полезного ископаемого. Поэтому такая простая формула приводит к положительным результатам. Отметим, что все операции согласованы во времени, что в данном случае является важным фактором.

Рассмотрены возможности ДКС и его применимость для решения проблемы движения техники на примере реального карьера. Для сравнения применимости коэффициента модель движения скорректирована с помощью алгоритма муравьиной колонии. Оптимизация на основе детального коэффициента соответствия повысила производительность добычи на 10,6 % (добыча руды 12 %, разработка вскрыши 7 %). Несмотря на общее повышение производительности на 1 %, АМК привел к значительному повышению добычи руды на 21 % и снижению разработки вскрыши на 14 %. ДКС имеет больше преимуществ в оптимизации парка машин на открытом месторождении.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Oraee K. and Goodarzi A.** General approach to distribute waste rocks between dump sites in open cast mines, Proc. of 16<sup>th</sup> Int. Symp. on Mine Planning and Equipment Selection, Bangkok, Thailand, 2007.
2. **Hartman H. L.** Introductory mining engineering, New York, Wiley, 1978. — P. 701–712.
3. **Darling P.** SME mining engineering handbook, Society for Mining, Metallurgy, and Exploration, Inc., 2011.
4. **Burt C. N.** An optimization approach to materials handling in surface mines, Ph. D., Curtin University of Technology, 2008.
5. **Douglas J.** Prediction of shovel-truck production: a reconciliation of computer and conventional estimates, Stanford University, California, 1964, Vol. 37.
6. **Morgan W. C. and Peterson L. L.** Determining shovel-truck productivity, Min. Eng., 1968, Vol. 20, No. 12. — P. 76–80.
7. **Smith S. D., Osborne J. R., and Forde M. C.** Productivity estimation in back-acter/dump-truck earth-moving operations, Proc. of the Institution of Civil Engineers – Transport, 1995, Vol. 111, No. 2. — P. 125–131.
8. **Gransberg D. D.** Optimizing Haul unit size and number based on loading facility characteristics, J. Const. Eng. Manage., 1996, Vol. 122, No. 3. — P. 248–253.
9. **Ta C. H., Ingolfsson A., and Doucette J.** A linear model for surface mining haul truck allocation incorporating shovel idle probabilities, Eur. J. Oper. Res., 2013, Vol. 231, No. 3. — P. 770–778.
10. **Rodrigo M., Enrico Z., Fredy K., and Adolfo A.** Availability-based simulation and optimization modeling framework for open-pit mine truck allocation under dynamic constraints, Int. J. Min. Sci. Tech., 2013, Vol. 23, No. 1. — P. 113–119.
11. **Zhang L. and Xia X.** An integer programming approach for truck-shovel dispatching problem in open-pit mines, Energy Procedia, 2015, Vol. 75. — P. 1779–1784.
12. **Makui A., Teimoury E., and Sarkissian A.** Development of an open-pit transportation mathematical model to improve productivity, Int. J. Ind. Eng. Prod. Manage., 2010, Vol. 21, No. 3. — P. 81–92.
13. **Delasay M., Kolfal B., and Ingolfsson A.** Maximizing throughput in finite-source parallel queue systems, Eur. J. Oper. Res., 2012, Vol. 217, No. 3. — P. 554–559.
14. **Ercelebi S. G. and Bascetin A.** Optimization of shovel-truck system for surface mining, J. S. Afr. Inst. Min. Metall., 2009, Vol. 109, No. 7. — P. 433–439.
15. **Krause A. and Musingwini C.** Modelling open-pit shovel-truck systems using the Machine Repair Model, J. S. Afr. Inst. Min. Metall., 2007, Vol. 107, No. 8. — P. 469–476.
16. **Kaba F. A., Temeng V. A., and Eshun P. A.** Prediction of mining production using Arena simulation, Proc. of 3rd UMaT Biennial Int. Mining and Mineral Conference, Tarkwa, Ghana, 2014. — P. 169–177.
17. **Kang J. H., Ahn S. M., and Nam J. H.** Productivity assessment of rock transportation trucks using simulation technology, Proc. of Int. Symp. of Automation and Robotics in Construction, Tokyo, Japan, 2006. — P. 592–595.
18. **Hashemi A. S. and Sattarvand J.** Application of Arena simulation software for evaluation of open pit mining transportation systems — a case study, Proc. of 12th Int. Symp. Continuous Surface Mining, Aachen, German, 2014. — P. 213–224.
19. **Ortiz C. E. A., Curi A., and Campos P. H.** The use of simulation in fleet selection and equipment sizing in mining, Proc. of 22th Mine Planning and Equipment Selection, Dresden, German, 2013. — P. 869–877.
20. **Shishvand M. S. and Sattarvand J.** Long term production planning of open pit mines by ant colony optimization, Eur. J. Oper. Res., 2015, Vol. 240, No. 3. — P. 825–836.
21. **Bissiri Y.** Application of agent-based modelling to truck-shovel dispatching in open pit mines, Ph.D., Min. Eng., British Columbia, 2002.
22. **Iravani S. M. R.** Queuing systems Poisson and Markovian process, 2nd ed. Vol. 1, Tehran, Iran University of science and technology, 2012.

Поступила в редакцию 24/X 2018

После доработки 27/XI 2018

Принята к публикации 29/I 2019