

УДК 622.271:622.341

**МЕТОДИКА ФОРМИРОВАНИЯ ПОГРУЗОЧНО-ТРАНСПОРТНОГО
КОМПЛЕКСА ГЛУБОКИХ КАРЬЕРОВ ПОЛИМЕТАЛЛИЧЕСКИХ РУД**

Т. М. Кумыкова, В. Х. Кумыков

*Восточно-Казахстанский государственный технический
университет им. Д. Серикбаева, E-mail: ktm6010@mail.ru,
ул. Протозанова А. К., 69, 070004, г. Усть-Каменогорск, Республика Казахстан*

Представлена методика выбора погрузочно-транспортного комплекса в рудном забое карьера при разработке полиметаллических руд. При обосновании комплекса забойного технологического оборудования “экскаватор – автосамосвал” использован метод статистических испытаний (метод Монте-Карло). На основании хронометражных наблюдений установлены зависимости производительности технологического комплекса от коэффициента разрыхления и содержания негабаритных кусков в рудной массе, подтверждена достоверность выбора забойного технологического комплекса по данному критерию. С использованием закона Пальма определено число автосамосвалов и очередность их установки под погрузку при одноканальной системе обслуживания.

Статистические испытания, комплекс “экскаватор – автосамосвал”, негабариты, кусковатость, забой, карьер

Открытые и разведанные крупные по запасам сложноструктурные (стратиформные и колчеданно-полиметаллические) месторождения цветных металлов существенно укрепили сырьевую базу цветной металлургии стран СНГ. Некоторые из них (Жайремское, Уч-Кулачское, Ушкатын-III, Николаевское) разрабатываются, другие подготавливаются к промышленному освоению (Шалкиинское, Озерное, Холоднинское).

Опыт промышленного освоения месторождений данного типа выявил множество технологических недоработок, связанных с традиционным, во многом неприемлемым, подходом к решению задач комплексного и рационального использования запасов месторождений, отличающихся разнообразием промышленных сортов руд, контрастностью свойств, пожароопасностью, технологической неустойчивостью качества. Это обуславливает высокие потери руды в процессе экскавации и транспортирования, в первую очередь из-за недостаточной гибкости выбора забойного технологического комплекса.

В имеющихся публикациях [1–4] нет единого подхода к решению проблемы выбора и формирования забойного выемочно-транспортного оборудования. Так, в [1] не рассматривается совместная работа экскаватора и автосамосвала, не дается методика комплектования выемочного и транспортного оборудования. Предлагается оптимизировать только работу транспортного комплекса без увязки с добычным оборудованием. Не учитываются влияния на работу горнотранспортной системы направления развития горных работ в карьере (по глубине и в плане) и количество вовлекаемых в разработку уступов. В [2] предложен метод формирова-

ния транспортных схем глубоких карьеров технологическими модулями с применением мобильных дробильно-перегрузочных комплексов. В [3] показана целесообразность разработки методики планирования производительности экскаваторов и погрузчиков на карьерах и программы ее реализации на ЭВМ, позволяющие повысить эффективность горных работ на карьерах за счет увеличения числа оптимизируемых параметров, высокой оперативности и точности выполнения расчетов. В [4] разработана методика определения технической производительности выемочно-погрузочных машин, более объективно отражающая ее взаимосвязь с показателями свойств горных пород и наиболее полно учитывающая влияние горнотехнических факторов.

В настоящей статье дается научное обоснование формирования горнотранспортной системы рудного забоя карьера, а именно предлагается рациональное соотношение выемочно-погрузочного и транспортного комплекса “экскаватор – автосамосвал”.

Для обеспечения надежности работы горнотранспортной системы карьера с использованием методов статистических испытаний (метод Монте-Карло) необходимо учитывать особенности стратиформных полиметаллических месторождений атасуйского типа, представленных множеством сортов руд, в том числе склонных к интенсивному окислению и самовозгоранию (содержание сульфидной серы 20 % и более). Такие руды и вмещающие их породы обладают различными физико-механическими свойствами, обуславливающими стохастический характер работы горнотранспортной системы карьера, причем эти свойства изменяются с увеличением глубины карьера. В этой связи метод Монте-Карло идеально применим для формирования горнотранспортного комплекса в системе “карьер”.

Современные карьеры цветной металлургии, оснащенные мощным комплексом технологического оборудования, делятся на несколько экскаваторных участков, различающихся по типу применяемых экскаваторов и грузоподъемности автосамосвалов [5]. Вскрышные работы обслуживают экскаваторы ЭКГ-8И в сочетании с автосамосвалами большой грузоподъемности: БелАЗ-549 грузоподъемностью 75 т с двигателем мощностью 770 кВт; БелАЗ-7519 грузоподъемностью 110 т с двигателем мощностью 955 кВт; БелАЗ-7521 грузоподъемностью 180 т с двигателем мощностью 1690 кВт.

В последние два десятилетия на карьерах Казахстана используются автосамосвалы японских и американских фирм: R-170 грузоподъемностью 154 т (Ewklid, США), HD-1200 и HD-1600 грузоподъемностью 120 и 160 т соответственно (Komatsu, Япония).

На добычных работах занято оборудование с меньшими значениями геометрических параметров ковшей экскаваторов и кузовов автосамосвалов: экскаваторы с прямой лопатой — ЭКГ-4.6Б с ковшем вместимостью 4.6 и 5 м³; ЭКГ-5А с ковшем вместимостью 5 м³ с электрическим приводом. Конструкция таких экскаваторов позволяет разрабатывать скальные породы и тяжелые руды с перемещением рабочего органа по сложной траектории в пределах горизонта установки машин. В последние годы все шире используются экскаваторы с гидроприводом. Их особенность — значительно меньшая масса по сравнению с механическими лопатами соответствующей производительности и наличие ковша, поворотного относительно рукояти в вертикальной плоскости. Это обеспечивает преимущества при экскавации, например при отдельной выемке технологических сортов руд, что важно для формирования качества рудопотока начиная с уровня призабойного этапа усреднения. Технологические комплексы оборудования с автомобильным транспортом, нашедшие наибольшее применение на карьерах цветной металлургии, формируют с учетом качественной и количественной взаимосвязи между машинами, непосредственно закрепленными за забоем, а также с оборудованием смежных технологических процессов.

Для подбора комплекса “экскаватор – автосамосвал” следует исходить из его часовой производительности, поскольку при этом учитываются такие важные параметры, как вместимость ковша экскаватора E_3 и кузова автосамосвала E_a , число ковшей n_k для загрузки емкости, коэффициент экскавации k_3 и другие характеристики. Степень рационального совмещения оборудования определяется условием

$$\frac{Q_3}{Q_a} = nk_p, \quad (1)$$

где Q_3 , Q_a — соответственно производительность экскаватора и автосамосвала, $\text{м}^3/\text{ч}$; n — количество автосамосвалов, обслуживающих экскаватор; $k_p = 1.3 - 1.5$ — коэффициент резерва, функция множества факторов.

Эксплуатационная производительность — наиболее устойчивый параметр, определяющий надежность функционирования системы во времени. Для экскаватора, работающего на погрузке в забое, его значение может быть установлено по формуле

$$Q_3 = 60E_3n\frac{k_3}{T_3}. \quad (2)$$

Здесь E_3 — вместимость ковша экскаватора, м^3 ; k_3 — коэффициент экскавации, зависящий от коэффициента разрыхления горной массы k_{px} ; T_3 — время загрузки одного автосамосвала, мин.

На основании обработки данных статистических наблюдений [6] с использованием стандартных программ STAT получена эмпирическая формула зависимости коэффициента экскавации от коэффициента разрыхления рудной массы:

$$k_3 = 0.56(1 - e^{-1.95k_{px}}). \quad (3)$$

Согласно установленной зависимости, с увеличением степени дробления массива пород возрастает коэффициент экскавации k_3 . Значения коэффициента экскавации для пород III–IV категорий взрываемости, найденные с помощью (3), даны в табл. 1.

ТАБЛИЦА 1. Зависимость коэффициента экскавации от коэффициента разрыхления горной массы

k_{px}	k_3	Категория взрываемости пород
1.1–1.3	0.60	V–VI
1.4–1.6	0.65	IV–V
1.7–1.8	0.70	III–IV

Исследована зависимость производительности забойного технологического комплекса от степени рыхления рудной массы и типа погрузочного оборудования (рис. 1).

Время загрузки T_3 автосамосвала является также функцией коэффициента рыхления. Вид связи

$$T_3 = 2.09 + 1.15e^{-1.11k_{px}} \quad (4)$$

определен на основе хронометражных наблюдений в течение смены при погрузке дробленой массы, представленной смешанными свинцово-цинковыми рудами Дальнезападного участка Жайремского ГОКа. Рассматривается конкретная горно-транспортная система погрузочного экскаватора ЭКГ-5А вместимостью ковша 5 м^3 и автосамосвала БелАЗ-548А. Численные значения T_3 при взрывании массива блоков приведены в табл. 2.

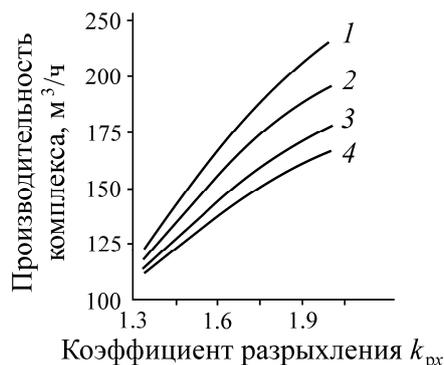


Рис. 1. Зависимость производительности технологического комплекса от степени рыхления рудной массы: 1 — ЭКГ-5А – БелАЗ-5458; 2 — ЭКГ-5А – БелАЗ-540А; 3 — ЭКГ-4.6Б – БелАЗ-548А; 4 — ЭКГ-4.6Б – БелАЗ-540А

ТАБЛИЦА 2. Зависимость времени загрузки автосамосвала БелАЗ-548А экскаватором ЭКГ-5А от коэффициента разрыхления рудной массы

$k_{рх}$	T_z , мин	Категория взрываемости пород
1.7–1.8	1.1–1.4	III–IV
1.6–1.4	1.5–1.7	IV–V
1.1–1.3	1.8–2.5	V–VI

На основе (3) и (4) нетрудно вычислить среднюю сменную производительность $Q_{см}$ одного экскаватора, зависящую от часовой производительности по рудной массе:

$$Q_{см}^3 = Q_T k_{и} T_{см}, \tag{5}$$

где Q_T — техническая производительность экскаватора, м³/ч; $k_{и}$ — коэффициент использования во времени; $T_{см}$ — продолжительность смены, ч.

Формула (5) позволяет установить сменную эксплуатационную производительность забойного экскаватора при детерминированном подходе к оптимизации горно-транспортного комплекса.

В соответствии с рекомендациями [7] оптимальное сочетание емкости ковша экскаватора E_3 в забое и кузова обслуживающего автосамосвала E_a будет при n_k , равном

$$n_k = \frac{E_a}{E_3} k_n. \tag{6}$$

Данная формула определяет число ковшей экскаватора n_k , необходимых для загрузки одного самосвала рудной массой при коэффициенте наполнения ковша $k_n \geq 1$.

Таким образом, с помощью соотношения (6) можно выбрать оптимальное сочетание выемочно-погрузочного и транспортного комплекса. При этом надо учитывать технологическую устойчивость работы автосамосвалов, которую можно характеризовать часовой производительностью в зависимости от степени дробления перевозимой горной массы, длины транспортирования, схем установки под загрузку и пр.

В общем случае часовая производительность автосамосвала составит

$$Q_a = E_a n \frac{60}{T_p}, \tag{7}$$

откуда можно найти количество n автосамосвалов, необходимых для обслуживания одного экскаватора:

$$n = \frac{Q_a T_p}{60 E_a}, \quad (8)$$

где T_p — время рейса самосвала от забойного экскаватора до места разгрузки и обратно, мин;
 E_a — вместимость кузова автосамосвала, m^3 .

С помощью формул (6)–(8) проведены хронометражные наблюдения [6, 8], цель которых — установить основные технологические параметры совмещения оборудования в конкретных горно-геологических условиях и выбрать на этой основе тип экскаватора для отработки сложного забоя, грузоподъемность автосамосвалов и их число, необходимое для обслуживания одного экскаватора. Эксперименты проводились в рамках научных исследований на Дальнезападном руднике открытых горных работ Жайремского ГОКа.

Рассмотрим эффективность совмещения экскаватора ЭКГ-4.6Б и БелАЗ-548А при отработке рудных блоков:

Коэффициент технической готовности автосамосвала	0.70
Коэффициенты:	
использования пробега	0.47
грузоподъемности	0.92
Скорость движения груженого автосамосвала (средняя), км/ч	19.60
Цикл одного черпания в зависимости от сложности забоя и коэффициента разрыхления, мин	0.30–0.45
Число ковшей экскаватора на загрузку одного самосвала в зависимости от коэффициента наполнения ковша	
$k_n = 0.90$	7
$k_n = 1.00$	5
$k_n = 1.11$	4
Время загрузки одного автосамосвала, мин	1.75–2.10
Расстояние откатки до рудных складов, км	1.60
Производительность автосамосвала, т·км/ч	17.20

Установлено, что при содержании некондиционных кусков в горной массе до 20 % производительность комплекса по разработке руд забоя падает с 195 до 148 $m^3/ч$ (на 23 % снижается производительность экскаватора ЭКГ-5А) и с 187 до 126 $m^3/ч$ (на 32 % — экскаватора ЭКГ-4.6Б) (рис. 2).

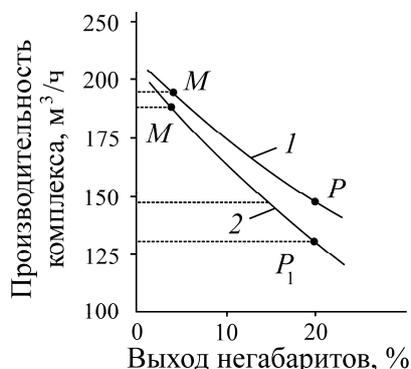


Рис. 2. Зависимость производительности комплекса от содержания негабаритных кусков в массе: 1 — ЭКГ-4.6Б–БелАЗ-548А; 2 — ЭКГ-5А–БелАЗ-548А

При равномерном дроблении рудной массы и среднем размере куска в навале 100 мм наибольшая производительность обеспечивается при работе комплекса по схеме продольной экскаваторной заходки шириной 7 м по подошве с фронтальной погрузкой в автосамосвал на уровне стояния.

Таким образом, на основании результатов теоретических и экспериментальных исследований можно заключить, что условием формирования производительного комплекса “экскаватор–автосамосвал” является оптимальное сочетание технологических и горно-геологических показателей. Интегральным, учитывающим все показатели, является кратность вместимости ковша экскаватора и кузова автосамосвалов. Кратность, определяемая числом ковшей экскаватора для загрузки одного автосамосвала, может быть получена расчетным методом с использованием зависимости (1). Для этого требуется проведение хронометражных наблюдений в конкретных горно-геологических условиях для уточнения ее значений. При этом производительность забойного комплекса должна быть рассчитана исходя из суммарного объема грузопотоков и эксплуатационной производительности каждого из элементов большой системы с учетом неравномерности работы карьера. В этой связи ставятся и решаются следующие задачи:

- найти оптимальное количество автосамосвалов выбранного типа для обслуживания одного забойного экскаватора с учетом резерва, необходимого для сглаживания производительности при неподтверждении объемов руды и ее сортности;
- найти вероятность отказа и надежность системы;
- установить оптимальное время ожидания автосамосвала в очереди под погрузкой и среднее время нахождения под погрузкой при сбалансированной работе экскаватора и автосамосвала.

Задачи в данной постановке решаются математическими методами теории исследования операций и ее раздела — системы массового обслуживания (СМО) при условии, что все потоки событий, переводящие СМО из одного состояния в другое, пуассоновские [9, 10].

Главными параметрами СМО являются: число каналов z , по которым осуществляется связь элементов системы, интенсивность потока системы λ и интенсивность обслуживания μ [11, 12]. При решении задач комплектования горно-транспортных систем можно принять пуассоновский стационарный поток, где интервал времени t между состояниями системы — случайная величина, распределенная по показательному закону:

$$f(t(T)) = \lambda e^{-\lambda t}, \quad t > 0, \quad (10)$$

здесь λ — интенсивность потока автосамосвалов на отрезке t .

Для условий карьера при применении автомобильно-транспортной системы разработки примем одноканальную СМО (один забой — один экскаватор) [9, 13]. Если λ — среднее число автосамосвалов на временном отрезке t (подъехавших в единицу времени), забой может обслужить автосамосвалы с интенсивностью μ (т. е. в среднем непрерывно занятый экскаватор будет загружать μ автосамосвалов в единицу времени). При этом самосвал, подъехавший в забой, когда экскаватор занят погрузкой, становится в очередь и ожидает обслуживания.

Решим следующую задачу. Пусть по числу заявок, находящихся в очереди на обслуживание автосамосвалов одним экскаватором в забое и уже загружаемых самосвалов, система характеризуется следующими состояниями: \mathcal{E}^0 — экскаватор свободен и в ожидании автосамосвала отбраковывает некондиционные куски; \mathcal{E}^1 — под погрузкой находится один самосвал, очереди нет, экскаватор работает по нормальному циклу; \mathcal{E}^2 — экскаватор занят погрузкой,

в очереди на погрузку один автосамосвал; Θ^3 — под погрузкой один автосамосвал, в очереди на обслуживание два автосамосвала; Θ^k — экскаватор занят, в очереди $k-1$ автосамосвалов; Θ^{k+1} — экскаватор занят, k самосвалов в очереди на обслуживание.

Надо найти вероятности, предельные для каждого из этих состояний. Можно воспользоваться уравнениями Эрланга для схемы гибели и размножения регулярного потока с ограниченными последствиями (поток Пальма) [9, 12].

Согласно предложенной методике, отсутствие последствия в потоке означает, что автосамосвалы, образующие поток, появляются в последовательные моменты времени независимо друг от друга. Например, очередной автосамосвал едет в забой под погрузку до завершения рейса первым автосамосвалом. Интервал времени между соседними состояниями системы в потоке Эрланга k -го порядка можно рассматривать как сумму k независимых случайных величин: $t = \sum_{i=1}^k t_i$.

Распределение интервала между временными отрезками t_i и t_{i+1} есть закон Эрланга k -го порядка. При этом вероятность того, что величина t_i примет значение меньше, чем t состояния потока, задается функцией распределения [12]: $\Phi(t_i) = P(T > t)$ (T — продолжительность смены, в течение которой система может переходить из одного состояния в другое).

Вероятность нахождения системы в пределах временного отрезка $t_0 + \tau$ (τ — отрезок времени на $t \in T$) равна

$$P_m = \frac{a^m}{m!} e^{-a}, \quad m = 0, 1, \dots, M,$$

где a — среднее число событий на отрезке τ .

Так как рассматривается стационарный пуассоновский поток, то $a = \lambda\tau$. Параметр λ определяет пропускную способность экскаватора.

Если начальные условия СМО характеризуются вероятностями $P_0(0) = 1, \dots, P_1(0) = \dots = P_n(0) = 0, m = 0, 1, \dots, M$, то можно установить выражения предельных состояний СМО в зависимости от значений соотношений $\rho = \lambda / \mu$ (λ — интенсивность потока автосамосвалов; μ — интенсивность обслуживания потока автосамосвалов).

Значения предельных вероятностей состояний $\Theta^0, \dots, \Theta^k$ комплекса “экскаватор–автосамосвал” находятся по формулам:

$$P_1 = \rho P_0, \quad P_k = \rho^k P_0, \dots, \quad P_{m+1} = \rho^{m+1} P_0, \quad (11)$$

где $P_0 = (1 - \rho) / (1 - \rho^{m+2})$.

Отсюда получим значения вероятностей состояния СМО в терминах теории массового обслуживания [9, 11]:

$$P_0(\Theta^0) = \frac{1 - \rho}{1 - \rho^{m+2}}, \quad (12)$$

$$P_1(\Theta^1) = \rho P_0, \quad (13)$$

$$P_k(\Theta^k) = \rho^k P_0, \quad (14)$$

$$P_{k+1}(\Theta^{k+1}) = \rho^{k+1} P_0, \quad (15)$$

$$P_m(\Theta^m) = \rho^m P_0, \quad (16)$$

$$P_{m+1}(\Theta^{m+1}) = \rho^{m+1} P_0. \quad (17)$$

Располагая предельными значениями вероятностей состояния системы “экскаватор – автосамосвал”, нетрудно вычислить относительную пропускную способность забоя q^3 как разницу между полной вероятностью 1 и вероятностью отказа $P_{\text{отк}}$ заявки в случае, если в забое находится очередь автосамосвалов под погрузку и число мест m в забое заняты:

$$q^3 = 1 - P_{\text{отк}} = \frac{\rho^{m+1}(1-\rho)}{1-\rho^{m+2}}.$$

Абсолютная пропускная способность забоя q^a (среднее количество автосамосвалов, которое может обслужить экскаватор в единицу времени) определяется интенсивностью потока автосамосвалов λ :

$$q^a = q^3 \lambda. \tag{18}$$

Среднее число автосамосвалов \tilde{n} , находящихся в очереди, является дискретной случайной величиной, зависящей от числа автосамосвалов R в очереди на погрузку:

$$\tilde{n} = M[R], \tag{19}$$

где $M[R]$ — математическое ожидание числа автосамосвалов в очереди на погрузку.

Вывод конечной формулы для раскрытия (19) базируется на следующем заключении. С вероятностью P_2 (14) в очереди на погрузку стоит один автосамосвал, с вероятностью P_3 — два автосамосвала, с вероятностью P_k в очереди стоят $k-1$ автосамосвала, с вероятностью P_{m+1} в очереди стоят m автосамосвалов.

Среднее число автосамосвалов в очереди получим, умножая число автосамосвалов на соответствующую им вероятность и складывая результаты:

$$\begin{aligned} \tilde{n} &= 1P_2 + 2P_3 + \dots + (k-1)P_k + \dots + mP_{m+1} = \\ &= 1\rho^2 P_0 + 2\rho^3 P_0 + \dots + (k-1)\rho^k P_0 + \dots + m\rho^{m+1} P_0 = \\ &= \rho^2 P_0 [1 + 2\rho + \dots + (k-1)\rho^{k-2} + \dots + m\rho^{m-1}]. \end{aligned} \tag{20}$$

Сумма в квадратных скобках выражения (20) представляет собой производную по ρ суммы $\Sigma = \rho + \rho^2 + \dots + \rho^{k-1} + \dots + \rho^m$, а для этого выражения воспользуемся формулой суммы геометрической прогрессии:

$$\Sigma = \frac{\rho - \rho^{m+1}}{1 - \rho}. \tag{21}$$

Продифференцируем (21) по ρ :

$$\begin{aligned} \Sigma_\rho &= \frac{[1 - (m+1)\rho^m](1-\rho) + (\rho - \rho^{m+1})}{(1-\rho)^2} = \\ &= \frac{1 - (m+1)\rho^m - \rho + (m+1)\rho^{m+1} + \rho - \rho^{m+1}}{(1-\rho)^2} = \\ &= \frac{1 - (m+1)\rho^m + m\rho^{m+1}}{(1-\rho)^2} = \frac{1 - \rho^m(m+1 - m\rho)}{(1-\rho)^2}. \end{aligned}$$

Таким образом, сумма в квадратных скобках выражения (20) будет равна

$$[1 + 2\rho + \dots + (k-1)\rho^{k-2} + \dots + m\rho^{m-1}] = \frac{1 - \rho^m(m+1 - m\rho)}{(1-\rho)^2}.$$

Подставим его в выражение (20) и учитывая (12), получим расчетную формулу для определения среднего числа автосамосвалов в очереди на обслуживание

$$\tilde{n} = \rho^2 P_0 \frac{1 - \rho^m (m + 1 - m\rho)}{(1 - \rho)^2} = \frac{\rho^2 (1 - \rho) [1 - \rho^m (m + 1 - m\rho)]}{(1 - \rho^{m+2})(1 - \rho)^2} = \frac{\rho^2 [1 - \rho^m (m + 1 - m\rho)]}{(1 - \rho^{m+2})(1 - \rho)}, \quad (23)$$

где m — число мест в забое, которое может быть занято автосамосвалами.

Далее надо установить среднее число автосамосвалов \tilde{d} , находящихся в очереди и под обслуживанием на временном отрезке $\tau \in T$. Оно будет равно сумме математических ожиданий числа автосамосвалов R в очереди и числа автосамосвалов S под погрузкой: $\tilde{d} = M[R] + M[S]$; так как $M[R] = \tilde{n}$, $M[S] = \tilde{s}$, то $\tilde{d} = \tilde{n} + \tilde{s}$.

Случайная величина \tilde{s} принимает значение 0 или 1 (поскольку рассматривается одноканальная система). Если экскаватор свободен, то $\tilde{s} = 0$ с вероятностью

$$P_0 = \frac{1 - \rho}{1 - \rho^{m+2}}, \quad (24)$$

если экскаватор занят, то $\tilde{s} = 1$ с вероятностью

$$P_1 = 1 - P_0 = \frac{\rho - \rho^{m+2}}{1 - \rho^{m+2}}. \quad (25)$$

На основании (24) и (25) найдем среднее число \tilde{s} автосамосвалов под погрузкой:

$$\tilde{s} = 0P_0 + 1P_1 = \frac{\rho - \rho^{m+2}}{1 - \rho^{m+2}}. \quad (26)$$

Подставив полученные значения \tilde{n} из (23) и \tilde{s} из (26), получим

$$\tilde{d} = \frac{\rho^2 [1 - \rho^m (m(1 - \rho) + 1)]}{(1 - \rho^{m+2})(1 - \rho)} + \frac{\rho - \rho^{m+2}}{1 - \rho^{m+2}}. \quad (27)$$

Уравнение (27) есть вероятностная модель состояния системы, позволяющая установить среднее число автосамосвалов заданной грузоподъемности, закрепленных за одним забойным экскаватором на временном отрезке $(t + \tau) \in T$ срока отработки запасов блока. Надо определить среднее время ожидания \tilde{t} автосамосвала в общей очереди.

Будем рассуждать так: если \tilde{d} — среднее число автосамосвалов, обслуживающих экскаватор, то с вероятностью $P_{\tilde{d}}$ вновь пришедший автосамосвал займет место в очереди и будет ждать \tilde{d} / μ минут, $\tilde{d} = \overline{1, m}$, т. е. автосамосвал находится в общей системе обслуживания. Помимо числа m , другие машины не обслуживаются и уходят к другому экскаватору. Тогда среднее время ожидания определяется как сумма ожиданий отдельных состояний системы на их вероятности:

$$\tilde{t} = P_1 \frac{1}{\mu} + \dots + P_k \frac{k}{\mu} + \dots + P_m \frac{m}{\mu}.$$

С учетом вероятностей состояний (12)–(17) имеем

$$\tilde{t} = \frac{P_0 \rho}{\mu} \frac{\{1 - \rho^m [m(1 - \rho) + 1]\}}{(1 - \rho)^2}. \quad (28)$$

Перепишем формулу (28), подставив вместо P_0 его значение из (24):

$$\tilde{t} = \frac{\rho\{1 - \rho^m[m(1 - \rho) + 1]\}}{\mu(1 - \rho^{m+2})(1 - \rho)}. \quad (29)$$

Найдем среднее время пребывания автосамосвала в общей очереди как сумму математических ожиданий автосамосвалов погрузки $M[t]$ и погрузки экскаватором $M[t_3]$:

$$t_{np} = M[t] + M[t_3],$$

где $M[t] = \tilde{t}$ (см. (29)); $M[t_3] = q^a / \mu$ — значение q^a устанавливается формулой (18).

С учетом вероятностей состояний (12)–(17) общее время пребывания автосамосвала в ожидании погрузки составит $t_{np} = \tilde{d} / \lambda + q^a / \mu$.

Получена вероятностная модель состояния системы и предложена методика определения среднего числа автосамосвалов заданной грузоподъемности, требующихся для обслуживания одного экскаватора на временном отрезке $t \in T$ (T — продолжительность работы карьера с момента окончания строительства). В свою очередь это является техническим обоснованием формирования рудопотоков.

Покажем на конкретном примере решения оптимизационной задачи схему использования методики для установления рационального соотношения экскаваторов и автосамосвалов.

Можно утверждать, что увеличение числа одновременно работающих на маршруте “забой экскаватора – рудные склады” транспортных единиц благоприятно для повышения эффективности отработки запасов, так как продолжительность простоев экскаватора уменьшается. Но наступает момент, когда дальнейшее увеличение числа автосамосвалов отрицательно сказывается на производительности карьера. Надо оптимизировать число транспортных единиц и параметры пуассоновского потока.

Пусть в экскаваторном забое, представленном многосортными рудами, одновременно могут находиться не более четырех автосамосвалов ($m = 4$), емкость кузовов которых соизмерима с вместимостью ковша экскаватора. Если в очереди одновременно находятся четыре машины, прибывший вновь автосамосвал в очередь не становится, а проезжает на погрузку в соседний забой. Поток автосамосвалов, прибывающих под погрузку, имеет интенсивность $\lambda = 0.9$. Процесс погрузки занимает 1.3 мин.

Необходимо установить: вероятность отказа СМО (экскаваторного забоя); относительную q^3 и абсолютную q^a пропускную способности СМО; среднее число автосамосвалов \tilde{n} , ожидающих погрузку; среднее число автосамосвалов \tilde{d} в экскаваторном забое, включая стоящих под погрузкой; среднее время \tilde{t} ожидания в очереди; среднее время t_{np} пребывания автосамосвала в забое. Процесс решения представляет собой следующую последовательность выполняемых операций.

1. Найдем приведенную интенсивность потока системы “экскаватор – автосамосвал”: $\mu = 0.9 / 1.3 = 0.7$, $\rho = 0.9 / 0.7 = 1.29$.

2. Определяем вероятности состояния системы в момент $(t + \tau)$ с использованием (12)–(17):

$$P_0(\mathcal{E}^0) = (1 - 1.29) / (1 - 1.29)^6 = 0.0804, \quad P_1(\mathcal{E}^1) = 1.29 \cdot 0.08 = 0.10,$$

$$P_2(\mathcal{E}^2) = 1.29^2 \cdot 0.08 = 0.13, \quad P_3(\mathcal{E}^3) = 1.29^3 \cdot 0.08 = 0.17,$$

$$P_4(\mathcal{E}^4) = 1.29^4 \cdot 0.08 = 0.22, \quad P_5(\mathcal{E}^5) = 1.29^5 \cdot 0.08 = 0.29.$$

Вероятность отказа системы 0.29.

3. Рассчитаем относительную ($q^3 = 1 - 0.29 = 0.71$) и абсолютную ($q^a = 0.71 \cdot 0.9 = 0.64$) пропускную способность системы.

4. Вычисляем среднее число автосамосвалов, ожидающих погрузку:

$$\tilde{n} = \frac{1.29^2[1 - 1.29^4(4(1 - 1.29) + 1)]}{(1 - 1.29^6)(1 - 1.29)} \approx 3$$

и среднее число машин, находящихся под погрузкой:

$$\tilde{s} = \frac{1.29 - 1.29^6}{1 - 1.29^6} = \frac{3.318}{3.608} = 0.92 \approx 1.$$

5. Определяем среднее число автосамосвалов, закрепленных за одним экскаватором в забое ($\tilde{d} = 3 + 1 = 4$) и среднее время ожидания машины в очереди ($\tilde{t} = \tilde{n} / \lambda = 3 / 0.9 = 3.3$ мин).

6. Находим среднее время пребывания автосамосвалов под погрузкой ($M[t_s] = 0.71 / 0.7 = 1$ мин) и среднее время, которое автосамосвал проводит в забое в ожидании погрузки ($\tilde{t}_{\text{пр}} = \tilde{t} + M[t_s] = 3.3 + 1 = 4.3$ мин).

Таким образом, реализация метода обоснования рационального соотношения между экскаватором и обслуживающими автосамосвалами доказывает его пригодность для оптимизационных расчетов в системе карьера.

ВЫВОДЫ

Разработана методика определения числа автосамосвалов при одноканальной системе массового обслуживания (один забой — один экскаватор), совместимых по технологическим и геометрическим параметрам рабочих органов (вместимость ковша экскаватора и емкость кузова автосамосвала), при отработке сложноструктурных рудных забоев. Производительность забойного комплекса рассчитывается исходя из суммарного объема грузопотоков и эксплуатационной производительности каждого из элементов системы “карьер”.

Предложенная методика формирования забойного технологического комплекса реализована в условиях карьеров Дальнезападного рудника Жайремского ГОКа и Николаевского карьера Восточно-Казахстанского медно-химического комбината. Исходными данными явились статистические наблюдения за работой системы в конкретных горно-геологических условиях, что обеспечило высокую степень достоверности результатов и их эффективность в практике эксплуатации карьеров, разрабатывающих сложноструктурные полиметаллические месторождения.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Веретенова Т. А., Вокин В. Н., Кисляков В. Е. Планирование транспортных работ на карьере на основе автоматизации расчетов параметров систем массового обслуживания // Маркшейдерия и недропользование. — 2011. — № 2. — С. 54–57.
2. Куролов А. А. Формирование транспортной схемы глубоких карьеров технологическими модулями при применении мобильных дробильно-перегрузочных комплексов: автореф. дис. ... канд. техн. наук. — М.: МГУ, 2007. — 21 с.
3. Молотилов С. Г., Ческидов В. И., Норри В. К. Методические основы планирования производительности выемочно-погрузочных машин на карьерах с автомобильным транспортом. Ч. I // ФТПРПИ. — 2008. — № 4. — С. 59–70.

4. **Молотилев С. Г., Ческидов В. И., Норри В. К., Ботвинник А. А.** Методика определения производительности выемочно-погрузочных машин на карьерах с автомобильным транспортом. Ч. II: Метод расчета технической производительности // ФТПРПИ. — 2009. — № 1. — С. 54–72.
5. **Ржевский В. В.** Открытые горные работы. Ч. 2: Технология и комплексная механизация. — М.: Недра, 1985. — 549 с.
6. **Кумыков В. Х.** Комплексная оптимизация систем и параметров открытой разработки сложноструктурных полиметаллических месторождений. — Усть-Каменогорск: ВКГТУ, 2004. — 304 с.
7. **Юматов Б. П., Байков Б. Н., Смирнов В. П.** Открытая разработка сложноструктурных месторождений. — М.: Недра, 1973. — 192 с.
8. **Кумыков В. Х., Ипалаков Т. Т., Кумыкова Т. М.** Принципы оптимизации направления развития горных работ в карьере. — Усть-Каменогорск: ВКГТУ, 2009. — 122 с.
9. **Вентцель Е. С.** Исследование операций. — М.: Сов. радио, 1972. — 552 с.
10. **Кофман А., Крюон Р.** Массовое обслуживание. Теория и приложения / под ред. И. Н. Коваленко. — М.: Мир, 1965. — 302 с.
11. **Метод статистических испытаний (метод Монте-Карло)** / Н. П. Бусленко, Д. И. Голенко, И. М. Соболев, В. Г. Срагович, Ю. А. Шрейдер / Справочная математическая библиотека. — М.: Физматгиз, 1962. — 331 с.
12. **Соболев И. М.** Метод Монте-Карло. — М.: Наука, 1972. — 64 с.
13. **Клейнрок Л.** Теория массового обслуживания / пер. с англ. И. И. Грушко; ред. В. И. Нейман. — М.: Машиностроение, 1979. — 431 с.

Поступила в редакцию 2/XII 2016