© Ю.В. Лаптев, Р.С. Титов, 2014

УДК 622.013.36

Ю.В. Лаптев, Р.С. Титов

ОПТИМИЗАЦИЯ ПАРАМЕТРОВ МАТЕРИАЛЬНО-ПРОИЗВОДСТВЕННЫХ ЗАПАСОВ КАРЬЕРА В РЕЖИМЕ УСТОЙЧИВОГО РАЗВИТИЯ ГОРНОГО ПРЕДПРИЯТИЯ

Представлены результаты исследований по оптимизации резервов мощностей горно-обогатительного предприятия на примере ОАО «Ураласбест», а также перспективных технологий рудоподготовки с применением грохотильно-перегрузочных пунктов.

Ключевые слова: рудоподготовка, материально-технические запасы, автокорреляционная функция, транспортный поток, грохотильно-перегрузочный пункт, оптимизация.

Современные горные предприятия представляют собой сложные производственные системы. Обеспечить требуемую производительность такой системы можно путем создания запасов внутри каждого единичного рудного потока, причем готовность и независимость процесса будет напрямую зависить от степени подготовленности запасов. Производственная мощность системы является взаимосвязанной со степенью подготовленности запасов.

На деятельность горного предприятия непосредственное и наи¬более существенное влияние по сравнению с другими группами запасов оказывают готовые к выемке запасы.

Определение оптимальных значений резервов мощностей и переход горных предприятий на работу с экономически обоснованными нормативами этих запасов является важной задачей, имеющей большое значение, для производства.

Перегрузочные склады как средства предприятия, используемые в целях обеспечения его деятельности, относятся к материально-производственным запасам. Готовые к выемке запасы горного производства необходимо считать обеспечивающими его материально-производственные запасы.

Оптимизация материально-производственных запасов, а, соответственно, и готовых к выемке запасов в условиях рыночной экономики приобретает особый и важный смысл в связи с происходящими в мире финансово-экономическими потрясениями.

В рамках решаемой задачи совокупность перегрузочных складов представляется как динамическое звено.

Перегрузочные склады являются частью динамической системы. Под динамической системой понимается совокупность средств преобразования исход-

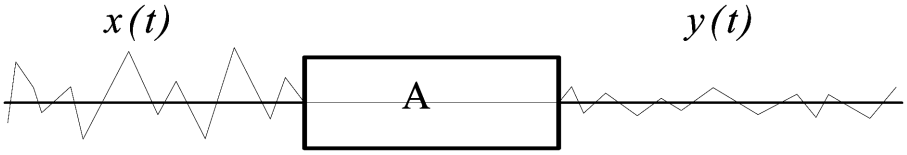

Рис. 1. Простейшая структура динамической системы

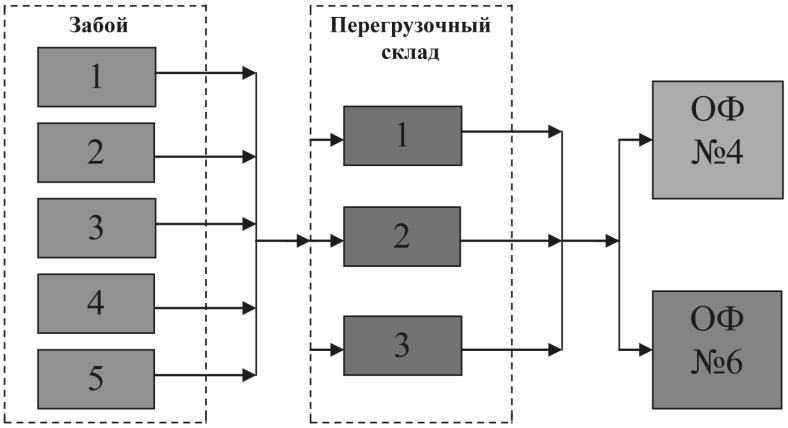

Рис. 2. Структурная схема динамической системы «забой – перегрузочный склад – ОФ» ОАО «Ураласбест»

ной информации по определенному алгоритму. Динамическая система включает в себя три основные составляющие: входной поток $x(t)$, оператор преобразования A и выходной поток $y(t)$ (рис. 1). Поток $x(t)$ называется воздействием, $y(t)$ – реакцией.

Перегрузочные склады как аккумулирующее и передаточное звено выполняют связующую функцию между автомобильным и железнодорожным транспортом, обеспечивающую работу перегрузки. Формирование карьерных транспортных потоков является важной научной и практической задачей, решение которой позволяет определить основные характеристики динамической системы «забой – перегрузочные склады – фабрика».

В теории транспортных потоков для оценки вероятности появления того или иного события, происходящего при движении автомобилей или составов, используются два метода.

Первый метод дает статистическую вероятность, которая имеет большое значение в математике; второй метод приводит к теоретической вероятности.

На рис. 2 представлена структурная схема динамической системы «забой – перегрузочный склад – обогатительная фабрика».

Теорию вероятности и математическую статистику можно сравнить с двумя пешеходами, приближающимися к одному и тому же дому с противоположных сторон улицы. В теории вероятности основные факторы известны, но результат нельзя предсказать с абсолютной достоверностью. В математической статистике имеется конечный результат, но причины, обусловившие его появление, неизвестны [2].

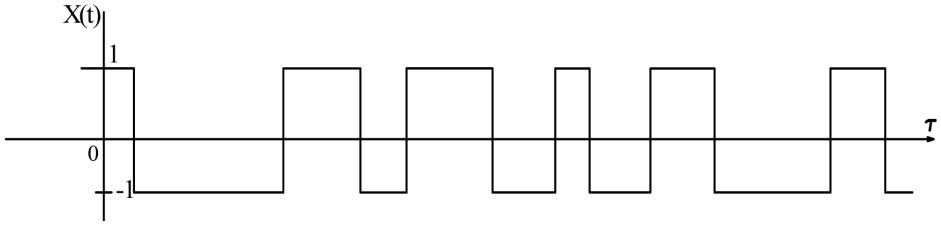

Рис. 3. Принципиальная схема динамического графика транспортного потока

Карьерный транспортный поток в данном случае рассматривается с точки зрения теоретической вероятности появления каждого транспортного объекта на разгрузке.

В практике научных исследований динамический график транспортного потока представляется в виде «телеграфного сигнала» (рис. 3).

Теоретическое конструирование карьерного транспортного потока предполагает следующее [1]:

• определение динамических характеристик потока на основе следующих положений;

• для потоков типа «телеграфная волна» справедливо равенство

$$R(\tau) = e^{-\lambda\tau} = \left(1 - \frac{2}{\overline{\tau}}\right)^{\tau}, \tag{1}$$

откуда

$$\lambda = -\ln\left(1 - \frac{2}{\overline{\tau}}\right), \tag{2}$$

где λ – коэффициент погашения автокорреляционной функции транспортного потока, $\overline{\tau}$ – средний полупериод колебания плотности транспортного потока за интервал времени;

• из условия (1) вытекает, что $\overline{\tau} > 2$;

• условиям простейшего или пуассоновского потока отвечает экспоненциальное распределение τ, как период отклонений;

• на вид распределения полупериода оказывает влияние обеспечение определенного режима подачи руды. При наличии трех и более рудных забоев, питающих склады, или обогатительную фабрику, транспортный поток приближается по своим характеристикам к схеме простейшего потока.

Таким образом, параметры и λ являются основными для оценки плотности карьерного транспортного потока.

В теоретическом плане параметры $\overline{\tau}$ и λ определяются следующим образом: в качестве теоретической модели формирования карьерного транспортного потока принимается схема с применением отрицательного биномиального распределения [2]. Отрицательное биномиальное распределение предполагает, что необходимо провести z испытаний сверх требуемых k. Если ввести обозначение $n = z+k$, то получается выражение

$$P(z;k;q) = C_{k+z}^{k} q^{k} (1-q)^{Z} \tag{3}$$

или

$$P(n;k;q) = C_{n}^{k} q^{k} (1-q)^{n-k}. \tag{4}$$

Последняя формула отражает биномиальное распределение с математическим ожиданием

$$\overline{\mu} = \frac{k \cdot (1-q)}{q}, \tag{5}$$

где q – вероятность единичного события: «поступление транспорта на разгрузку».

Величина q определяется из результатов исследований Д. Дрю [2]. В работе [2] утверждается, что «если средняя интенсивность прибытия в рассматриваемом периоде составляет 10 автомобилей в минуту, то вероятность прибытия 10

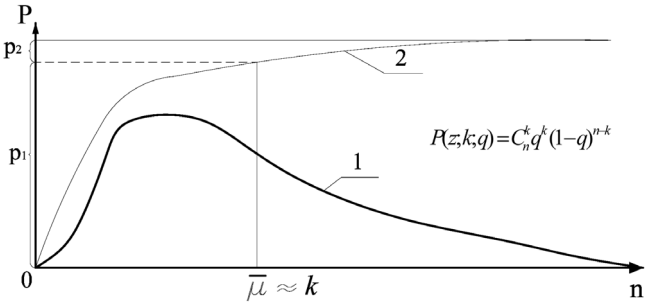

Рис. 4. Дифференциальная (1) и интегральная (2) кривые отрицательного биномиального распределения карьерного транспортного потока

и более автомобилей равна 0,54. Для любой пары последовательных интервалов длительностью 1 мин вероятность прибытия не менее 10 автомобилей в каждом интервале равна 0,54:0,54. Вероятность прибытия в каждом интервале менее десяти автомобилей составляет 0,46:0,46.

Остаются еще две возможности: в первом интервале прибывает не менее 10 автомобилей, а во втором интервале прибывает менее 10 автомобилей и наоборот. Вероятность каждой из этих комбинаций равна 0,54:0,46.

По совокупным данным Д. Дрю вероятность единичного события поступления транспортной емкости на разгрузку принимается $q \approx 0{,}5$.

На рис. 4 представлены дифференциальная и интегральная кривые отрицательного биноминального распределения плотности карьерного транспортного потока.

Величина $k\,(k_{а/с})$ требуемых событий для карьерного автотранспорта определяется из выражения

$$k = k_{а/с} = \overline{N}_{см} = \overline{N}_{заб} \cdot \overline{N}_{а/с}, \tag{6}$$

где $\overline{N}_{см}$ – среднее количество автосамосвалов, формирующих транспортный поток «забой-склад» в смену; $\overline{N}_{заб}$ - среднее количество добычных забоев выделяемых в смену на загрузку перегрузочных складов; $\overline{N}_{а/с}$ - среднее количество автосамосвалов, закрепленными за забойными экскаваторами, в смену.

Величина $k\,(k_{ж/д})$ требуемых событий поступления железнодорожных составов на фабрику определяется из выражения

$$k = k_{ж/д} = \overline{N}_{п/с} \cdot \overline{N}_{сост}, \tag{7}$$

где $\overline{N}_{п/с}$ – среднее количество перегрузочных складов, разгружающих добытую массу на фабрики; $\overline{N}_{сост}$ – среднее количество ж/д составов, закрепленных за перегрузочным складом.

В практике горного производства количество $k_{ж/д}$ является величиной, которую комбинат планирует и выделяет ежесменно. Количество испытаний z, сверх требуемого k в отрицательном биномиальном распределении определяется из соотношений

$$Z = A \cdot k, \tag{8}$$

$$A = \frac{t_{обсл}}{t_ц} = \frac{t_{обсл}}{t_{дв} + t_{обсл}}, \tag{9}$$

где A – доля времени обслуживания единицы транспорта $t_{обсл}$ в общем времени его рабочего цикла $t_ц$; $t_{дв}$ – время движения транспортной единицы, доставляющей рудный материал.

$$t_{\text{дв}} = \frac{S}{\overline{\text{v}}}, \qquad (10)$$

где S – средневзвешенное расстояние транспортирования рудного материала, $\overline{\text{v}}$ – средняя скорость доставки рудного материала груженым транспортом.

Время обслуживания карьерной транспортной единицы составляет

$$t_{\text{обсл}} = t_{\text{погр}} + t_{\text{ож}} + t_{\text{ман}} + t_{\text{разгр}} + t_{\text{пор}}, \qquad (11)$$

где $t_{\text{погр}}$ – время погрузки транспортного сосуда (автосамосвал, ж/д состав); $t_{\text{от}}$ – время ожидания погрузки – разгрузки; $t_{\text{ман}}$ – время маневрирования на разгрузочно-погрузочных площадках; $t_{\text{разгр}}$ – время разгрузки; $t_{\text{пор}}$ – время движения порожнего транспортного сосуда.

Представление динамического графика транспортного потока в виде «телеграфного сигнала» (см. рис. 3) предполагает наличие тренда по количеству «скачков». Этот способ используется в теории математической статистики, когда упорядоченная последовательность состоит из двух типов элементов, которые условно можно обозначить знаком (+) и (-). «Скачком» в данном случае называется интервал последовательности, включающий один или более одинаковых элементов. Статистическое распределение количества «скачков» в случайных последовательностях асимптотически близко к нормальному с математическим ожиданием

$$\overline{m} = \frac{2m_1 m_2}{m_1 + m_2} + 1, \qquad (12)$$

где m_1 – количество «скачков», включающих элементы со знаком (+); m_2 – количество «скачков», включающих элементы со знаком (-).

Значения m_1 и m_2 определяются из следующих выражений

$$m_1 = \overline{N}_{\text{ход}} \cdot p_1,$$
$$m_2 = \overline{N}_{\text{ход}} \cdot p_2 \qquad (13)$$

где $\overline{N}_{\text{ход}}$ – количество рейсов транспортных единиц в смену; p_1, p_2 – соответственно, доля «скачков» со знаками (+) и (-), определяемая из интегральной кривой распределения (рис. 4).

Исходя из выражения (13), величина $\overline{m}$, определяется следующим образом

$$\overline{m} = 2\overline{N}_{\text{ход}} \cdot p_1 \cdot p_2 + 1. \qquad (14)$$

Таким образом, средний полупериод динамического графика карьерного транспортного потока $\overline{\tau}$ имеет вид

$$\overline{\tau} = \frac{\overline{N}_{\text{ход}}}{\overline{m}} = \frac{\overline{N}_{\text{ход}}}{2\overline{\text{N}}_{\text{ход}} \cdot p_1 \cdot p_2 + 1}. \qquad (15)$$

Величина является в данном случае важной характеристикой, отражающей плотность транспортных потоков.

Перегрузочные склады по характеру своего функционирования с точки зрения теории автоматического регулирования можно отнести к инерционным звеньям первого порядка. Как следует из работ Лукаса В.А., Солодовникова В.В. и др. [3–5] инерционными звеньями первого порядка являются конструктивные элементы, которые могут накапливать и передавать вещество или энергию.

В случае накопления массы это полностью соответствует сути решаемой задачи.

Дифференциальное уравнение звена первого порядка имеет вид

$$T\frac{dy(t)}{dt} + y(t) = Kx(t), \tag{16}$$

где K – передаточный коэффициент, характеризующий свойства звена в статическом режиме; T – постоянная времени, характеризующая инерционность звена.

Переходную функцию звена можно найти из решения уравнения (16). Выражение для переходной функции имеет вид

$$h(t) = K(1 - e^{-\frac{t}{T}}), \tag{17}$$

где K – передаточный коэффициент, характеризующий свойства звена в статическом режиме; t – переменная времени.

В рамках решаемой задачи смысл коэффициента K приобретает значение количества транспортных емкостей, загружающих склад или бункер фабрики в смену. Постоянная времени T дифференциального уравнения (16) определяется из следующих преобразований:

• по совокупности требований [1] к формированию простейших потоков уравнения нормированной автокорреляционной функции для входного и выходного потоков имеют вид

$$R_{вх}(\tau) = e^{-\lambda_1|\tau|}, \quad R_{вых}(\tau) = e^{-\lambda_2|\tau|}, \tag{18}$$

где λ_1, λ_2 – соответственно, коэффициенты погашения автокорреляционной функции входного и выходного потоков, определяемые

$$\lambda_1 = -\ln(1 - \frac{2}{\overline{\tau}_{вх}}), \quad \lambda_2 = -\ln(1 - \frac{2}{\overline{\tau}_{вых}}). \tag{19}$$

где $\overline{\tau}_{вх}, \overline{\tau}_{вых}$ – соответственно, параметры среднего полупериода отклонений входного и выходного транспортного потока;

• определяются значения спектральной плотности входного и выходного потоков. В теории автоматического регулирования величина спектральной плотности случайного сигнала $S(\omega)$ связана с автокорреляционной функцией $R(\tau)$ сигнала преобразованием интеграла Винера-Хинчина

$$S(\omega) = \int_{-\infty}^{\infty} R(\tau) \cdot e^{-j\omega\tau} d\tau. \tag{20}$$

Для функции $R(\tau)$ вида

$$R(\tau) = e^{-\lambda\tau},$$

выражения спектральных плотностей потоков имеют вид

$$S_{вх}(\omega) = \frac{2\lambda_1}{\lambda_1^2 + \omega^2},$$

$$S_{вых}(\omega) = \frac{2\lambda_2}{\lambda_2^2 + \omega^2} \tag{21}$$

• определяется квадрат модуля амплитудно-частотной характеристики динамического звена «перегрузочные склады»

$$\left|\Phi(i\omega)\right|^2 = \frac{K^2}{T^2\omega^2 + 1}, \tag{22}$$

$$\left|\Phi(i\omega)\right|^2 = \frac{S_{вых}(\omega)}{S_{вх}(\omega)}. \tag{23}$$

Из соотношений (22) и (23) имеем

$$\frac{K^2}{T^2\omega^2 + 1} = \frac{S_{вых}(\omega)}{S_{вх}(\omega)} = \frac{2\lambda_2}{\lambda_2^2 + \omega^2} \cdot \frac{\lambda_1^2 + \omega^2}{2\lambda_1} = \frac{\lambda_2}{\lambda_1} \cdot \frac{\lambda_1^2 + \omega^2}{\lambda_2^2 + \omega^2}. \tag{24}$$

Преобразование соотношения (24) приводит к определению величины T, выражаемой следующим образом

$$T = \sqrt{\frac{K^2}{B\omega^2} \cdot \frac{\lambda_2^2 + \omega^2}{\lambda_1^2 + \omega^2} - \frac{1}{\omega^2}}, \tag{25}$$

где $B = \frac{\lambda_2}{\lambda_1}$.

Учитывая соотношение $\omega = \frac{1}{\tau}$, выражение (25) имеет вид

$$T = \sqrt{\frac{K^2\tau^2}{B} \cdot \frac{\lambda_2^2\tau^2 + 1}{\lambda_1^2\tau^2 + 1} - \tau^2}, \tag{26}$$

$$T = \tau\sqrt{\frac{K^2}{B} \cdot \frac{\lambda_2^2\tau^2 + 1}{\lambda_1^2\tau^2 + 1} - 1}. \tag{27}$$

Таким образом, величина T зависит от параметров входного и выходного потоков, связанных, соответственно, с параметрами автокорреляционных функций λ_1 и λ_2.

Учитывая, что параметр τ является интервальным показателем и запаздывающим в переходной функции $h(t)$, то при $\tau = 1$ получаем величину T для $h(t)$

$$T = \sqrt{\frac{K^2}{B} \cdot \frac{\lambda_2^2 + 1}{\lambda_1^2 + 1} - 1}. \tag{28}$$

Оптимизация динамических характеристик производится в предположении, что звено находится под влиянием детерминированного воздействия в виде единичной ступенчатой функции.

Переходный процесс, вызванный ступенчатым воздействием, является оптимальным, если он имеет монотонный характер, а время переходного процесса имеет минимальное возможное значение $T_{р\ min}$, совместимое с ограничением, наложенным на значение ускорения ϖ регулируемой величины.

Общая концепция оптимизации динамических характеристик переходной функции звена выражается следующей формулой

$$X_{\text{опт}}(t) = \lim_{t\to\infty} X_{\text{опт}}(t) = X_{\text{опт}}(\infty) = \frac{1}{3}\bar{\varpi}_{\max} T^2_{\text{pmin}}, \tag{29}$$

где $\bar{\varpi}_{\max}$ – максимальное ускорение кривой разгона переходной функции $h(t) = K(1 - e^{-\frac{t}{T}})$.

Для определения $\varpi_{\max}$ необходимо продифференцировать функцию $h(t)$ дважды и приравнять ее к «0».

Тогда

$$\varpi''_t = \frac{d^2 h(t)}{dt^2} = -\frac{K}{T^2} e^{-\frac{t}{T}}. \tag{30}$$

При $t = 0$

$$\varpi''_t = \varpi(\max) = \omega(t = 0) = -\frac{K}{T^2}. \tag{31}$$

Подставляя выражение (31) в формулу (29), получаем уравнение

$$X_{\text{опт}}(t) = -\frac{1}{3}\frac{K}{T^2} T^2_{\text{pmin}}. \tag{32}$$

На рис. 5 представлена принципиальная схема распределения параметров T на графике переходной функции $h(t)$.

На основе проведенных теоретических исследований можно сделать следующие выводы:

• параметры транспортного потока, поступающего на перегрузочные склады, зависят от соотношения: «время доставки груза/время обслуживания автотранспорта»;

• параметры транспортного потока «перегрузочные склады – ОФ», зависят от соотношения «время поставки рудного материала на ОФ/время обслуживания ж/д транспорта»;

• оптимальный объем карьерных перегрузочных складов как материально-производственных запасов зависит от параметров транспортных потоков «забой-склад» и «склад-обогатительная фабрика». В свою очередь плотность

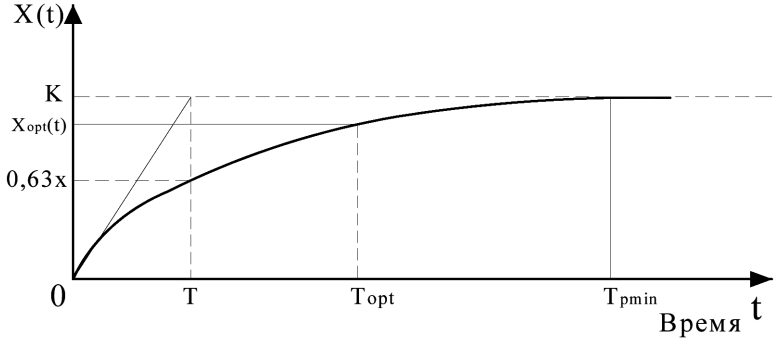

Рис. 5. Переходная функция динамического звена «перегрузочные склады»

транспортных потоков связана с соотношением «время доставки рудного материала на склад или ОФ/время рабочего цикла автомобильного и железнодорожного транспорта»;

• техническая оптимизация материально-технических запасов на ОАО «Ураласбест» показала, что резерв мощности и производственных запасов может составить 15–17%.

На сегодня в практике горных предприятий закрепились инженерные решения, связанные с использованием перегрузочных пунктов в карьере, специализированных складов на промплощадках фабрик, рудоконтрольных станций.

На основе исследований, проведенных на ряде предприятий разработана технология рудоподготовки в карьере с использованием грохотильно-перегрузочных пунктов (ГПП) [11]. Она предусматривает следующую организацию работ: просеивание поступающую из забоев рудные массы на неподвижных или вибрационных грохотах для дальнейшей переработке на ДОФ или отгрузку некондиционной рудной массы в отвал или на склад низкокачественного сырья.

Эффективность функционирование грохотильно-перегрузочных пунктов (ГПП) в карьере при предобогащении минерального и техногенного сырья связана с рядом факторов, таких как: длина грохота, размера щели, коэффициент живого сечения грохота, угол его наклона. В значительной степени эффективность грохочения на ГПП зависит от параметров горно-транспортного оборудования, разгружающего горную массу на грохот. Это в свою очередь определяет параметры разгрузочной площадки и, в конечном итоге, параметры ГПП.

Важным этапом оптимизации основных параметров, характеризующих процесс грохочения, являлось установление зависимости показателей, определяющих начальное движение горной массы при подаче ее на поверхность грохота (параметры горно-транспортного оборудования, производительность выгрузки транспортного средства на поверхность откоса грохота Q_o), начальная толщина слоя по питанию грохота h_0 и начальная скорость движения горной массы по откосу грохота υ_o. Расчет показателей движения массы производился на основе результатов моделирования процесса ее автомобильной выгрузки [12].

В таблице приведены исходные данные при подаче горной массы на поверхность грохота автомобильным транспортом для расчета параметров характеризующих процесс грохочения на грохотильно-перегрузочных пунктах.

Одним из основных параметров, характеризующих процесс грохочения, служит величина слоя потока материала в *i*-ом сечении грохота h_i, рассчитываемая формуле [7]:

Основные параметры автосамосвалов и кинематические характеристики выгрузки из них

Тип автосамосвала	Параметры выгрузки автосамосвалов				
	Грузоподъемность, т	Вместимость кузова, м³	Ширина кузова а, м	Производительность выгрузки Q_o, м³/с	Начальная скорость движения горной массы по откосу υ_o, м/с
БелАЗ-540	30	18	3,5	0,9	2,50
БелАЗ-548	40	26	3,6	1,3	2,60
БелАЗ-549	75	46	5,4	2,3	3,15
БелАЗ-7512	120	61	6,2	3,1	3,5

$$h_i = \frac{h_0 \vartheta_0}{\vartheta_i}\{1 - \left\langle p_i \cdot [\frac{n}{3 \cdot k \cdot \sqrt{h_0 \vartheta_0}} \cdot (\vartheta_i^{1,5} - \vartheta_0^{1,5})] \right\rangle\}^2 , \quad (33)$$

где ϑ_0 – начальная скорость движения сыпучей массы, м/сек; ϑ_i – скорость движения сыпучей массы по грохоту, м/сек; h_0 – начальная толщина слоя по питанию, связанная со средним размером куска подаваемого на грохочение, м; p_i – доля мелкого класса в исходном продукте, дол. ед.;

$$n = \lambda_{жс} \cdot \mu (g \cdot \cos\varphi)^{0,5} . \quad (34)$$

Скорость движения сыпучей массы по грохоту рассчитывается по формуле

$$\vartheta_i = \sqrt{\vartheta_0^2 + 2ky} = \sqrt{\vartheta_0^2 + 2gy[\sin\varphi - f'_д (1 - \lambda_{жс} \cdot \mu^2) \cdot \cos\varphi]} , \quad (35)$$

где $\lambda_{жс}$ – коэффициент живого сечения; g = 9,81 м/с^2 – ускорение свободного падения; $f'_д$ – коэффициент внешнего трения движения горной породы в сыпучем состоянии; y – текущая координата по длине грохота (y = 0–25), м; φ – угол наклона поверхности грохота, град (φ = 36°, 40°, 44°, 48°, 52°);

$$k = g[\sin\varphi - f'_д (1 - \lambda_{жс} \cdot \mu^2) \cdot \cos\varphi] ;$$

μ – коэффициент затрудненности просеивания (зависящий от физико-механических свойств материала и разрешающей способности сита). Для рудной горной массы можно принять μ = 0,005.

Коэффициент живого сечения $\lambda_{жс}$ рассчитывается по формуле

$$\lambda_{жс} = \frac{S_ж}{S_{общ}} = \frac{d_p}{d_p + b_p} , \quad (36)$$

где $S_ж$ – площадь свободного отверстия грохота, через которое непосредственно происходит отсеивание материала, м^2; $S_{общ}$ – площадь ячейки грохочения с учетом толщины сетки (решетки) грохота, м^2; $d_Р$ – размер щели, связаный с размером задаваемого куска подрешетного продукта, м; $b_Р$ – ширина рельса по низу (Р-65, 75), м.

Величина h_i определяет в конечном итоге выход надрешетного и подрешетного продуктов по длине грохота. Эффективность грохочения связана с содержанием подрешетного продукта в исходном материале и с выходом подрешетного продукта в i-ом сечении грохота.

Выход материала в подрешетный продукт определяется из выражения

$$\gamma_i = 1 - \frac{Q_{нi}}{Q_0^г} , \quad (37)$$

где $Q_{Нi}$ – расход по надрешетному продукту в i-ом сечении грохота, м^3/с; $Q_0^г$ – исходная производительность грохота по питанию, м^3/с.

Расход надрешетного продукта $Q_{Нi}$ по длине грохота определяется формулой

$$Q_{нi} = h_i \cdot \vartheta_i \cdot a , \quad (38)$$

где a – ширина просеивающей поверхности грохота, соизмеримая с шириной кузова автосамосвала, м.

Производительность грохота по питанию рассчитывается по формуле

$$Q_0^{г} = h_0 \cdot \vartheta_0 \cdot a \quad (39)$$

Определение параметров процесса грохочения на ГПП осуществляется исходя из заданного относительного содержания класса крупности подаваемого материала на поверхность грохота при условии равномерного распределения его внутри класса. Для расчетов было задано два класса крупности 0–150 мм – нижний класс (подрешетный) и 150–1000 мм – верхний класс (надрешетный) с долями относительного содержания по мелкому классу в исходном подаваемом материале 0,25, 0,5 и 0,75.

Принимая во внимание то, что уравнения (33) и (35) параметров h_i и ϑ_i, связаны с начальными величинами процесса грохочения h_0 и ϑ_0, конструктивными параметрами грохота α, $b_р$, y, физико-механическими свойствами подаваемого материала $f_д$, а также с относительной долей мелкого класса в исходном продукте p_i, то для расчета по этим уравнениям определяются следующие зависимости и соотношения:

Толщина слоя по питанию определяется следующим выражением

$$h_0 = \bar{d}_0 \cdot B \quad (40)$$

где B – коэффициент связанный с производительностью выгрузки автосамосвала; $\bar{d}_0$ – средний размер куска в исходном материале, м.

Коэффициент B определяется

$$B = Q_0 / Q_0^{min} \quad (41)$$

где Q_0 – производительность выгрузки автосамосвала, м$_3$/с; Q_0^{min} – производительность выгрузки принятого автосамосвала с наименьшей грузоподъемностью (30 т), при $B = \underline{1}$, м^3/с.

Соответственно, $\bar{d}_0$ определяется из выражения

$$\bar{d}_0 = \frac{\bar{d}_Н \cdot p_H + \bar{d}_В \cdot p_{iB}}{p_H + p_{iB}} \quad (42)$$

где $\bar{d}_Н$ – средний размер куска по нижнему классу, м; $\bar{d}_B$ – средний размер куска по верхнему классу, м; $p_{iН}$ – доля мелкого класса в исходном продукте (0,25, 0,5, 0,75), дол. ед.; $p_{iВ}$ – доля крупного класса в исходном продукте ($p_{iВ} = 1 - p_{iН}$), дол. ед.

Конструктивные параметры грохота задаются исходя из следующих соображений:

- размер щели грохота $d_р$ определяется в соответствии с заданным гранулометрическим составом подаваемой горной массы на его поверхность по нижнему классу крупности (подрешетный продукт). В расчетах принято нижний класс 0–150 мм, соответственно принимаем по максимальному куску класса $d^{150} = d_р$ =0,15 м;
- ширина элемента поверхности $b_р$ принимается исходя из принятой конструкции просеивающей поверхности грохота $b_р$ = 150 мм = 0,15 м;
- конечная длина грохота равна стандартной длине рельса 25 м. Для расчета параметров процесса грохочения задано шесть точек координат по длине грохота, соответственно, равных y = 0, 5, 10, 15, 20, 25 м;
- угол наклона грохота φ принимается в пределах изменения 35–55°. Для расчетов приняты углы, равные, соответственно φ = 36°, 40°, 44°, 48°, 52°.

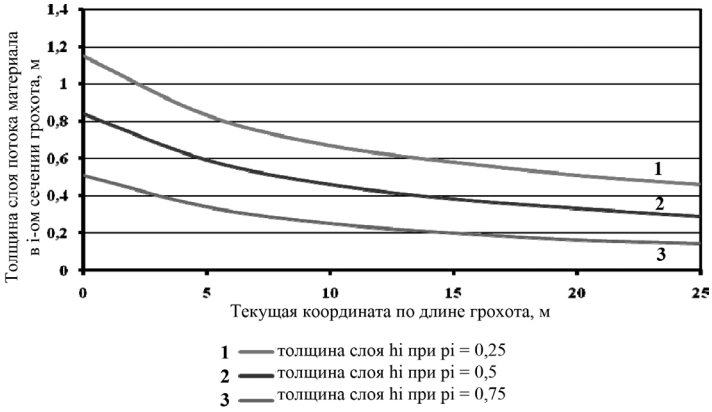

Рис. 6. График изменения толщины слоя h_i по длине грохота (при угле наклона грохота φ = 40° и грузоподъемности транспортного средства Q_A = 75 т)

Физико-механические показатели процесса грохочения учитываются коэффициентом трения *f* потока материала движущегося по наклонной поверхности [9].

Коэффициент внешнего трения движения горной породы в сыпучем состоянии определяется

$$f'_д = \mathrm{tg}\rho', \tag{43}$$

где ρ' – угол внешнего трения разрыхленной породы (ρ' = 36°, равный углу естественного откоса).

На рис. 6, 7 приведены графики изменения толщины слоя потока материала в *i*-ом сечении грохота h_i, скорости движения сыпучей массы по грохоту ϑ_i, выхода материала в подрешетный продукт γ_i и расхода по надрешетному продукту $Q_Н$ для автосамосвала грузоподъемностью $Q_А$ = 75 т, и угла наклона грохота φ = 40°.

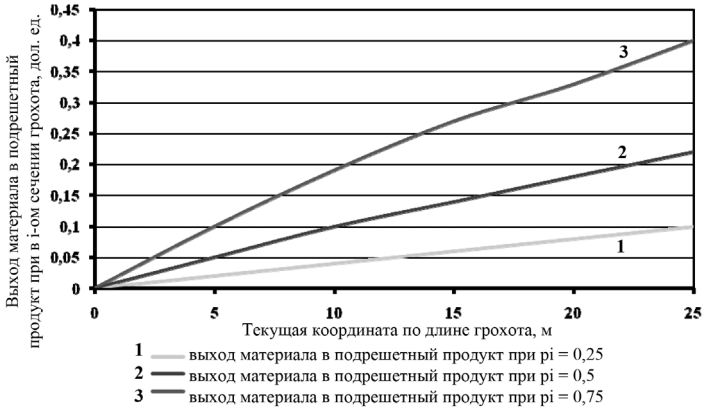

Рис. 7. График изменения выхода материала в подрешетный продукт по длине грохота (при угле наклона грохота φ = 40° и грузоподъемности транспортного средства Q_A = 75 т)

Определение оптимальных параметров грохотильно-перегрузочных пунктов производится по схеме расчета обобщенной функции желательности.

В качестве оптимизируемых в этом случае принимались два критерия (параметры функции желательности):

- выход материала в подрешетный продукт γ;
- расход надрешетного продукта по грохоту $Q_н$.

В качестве оптимизируемых параметров автотранспортного оборудования, разгружающего горную массу, служили скорость и производительность выгрузки на грохот (см. таблицу).

Алгоритм построения обобщенной функции желательности включал в себя следующее:

- построение шкалы желательности, устанавливающей соотношение между значением отклика $f(x)$ и соответствующим значением частной функции желательности d;
- вычисление частных функций желательности d;
- вычисление обобщенной функции желательности D.

Обобщенная функции желательности определяется из соотношения [6]

$$D = \sqrt[n]{d_1 d_2 \ldots d_n} = \left(\prod_{i=1}^{N} d_i \right)^{1/n} ; \qquad (44)$$

где d_i –частные функции желательности.

Значение $d = 0$ соответствует абсолютно неприемлемому значению целевой функции, при $d = 1$ значение целевой функции соответствует ее лучшему, предельному значению. Если $d = 0$, то обобщенная функция желательности D также равна нулю. С другой стороны если все $d_i = 1$, то и $D = 1$. Наилучшему результату оптимизируемых параметров соответствует максимальное значение функции D_{max}.

Частная функция желательности имеет экспоненциальную зависимость вида

$$d = \exp\{-\exp[-f(x)]\} . \qquad (45)$$

Функция D имеет оптимум, если выполняется условие

$$\sum_{1}^{N} f'(x_i) \exp[-f(x_i)] = 0 \qquad (46)$$

где $f'(x_i)$ – производная от функции $f(x_i)$ по x.

Приняв $f(x_i) = b_0 + b_1 x_i$ будем иметь

$$\sum_{1}^{N} b_1 \exp[-(b_0 + b_1 x_i)] = 0 \qquad (47)$$

где x_i – фактор оптимизации; b_0, b_1 – коэффициенты, определяемые заданными интервалами изменения $f(x)$.

Значение функции $f(x_i)$ находятся из условий

$$\left. \begin{array}{l} x_{min} \le x \le x_{max} \\ -f_i \le f \le f_i \end{array} \right\} . \qquad (48)$$

В данном случае $f = -f_i$ ставиться в соответствие с наихудшим значением фактора x; $f = f_i$ ставиться в соответствие с желательным или наилучшим значением x.

При производстве оптимизации функции $f(x_i)$ был задан интервал ее изменения от -2 до +2.

Согласно условиям (48) получаем:

для $Q_н$

$$\left.\begin{array}{l} Q_{H\min} \le Q \le Q_{H\max} \\ -2 \le f \le 2 \end{array}\right\}; \qquad (49)$$

для γ

$$\left.\begin{array}{l} \gamma_{\min} \le \gamma \le \gamma_{\max} \\ -2 \le f \le 2 \end{array}\right\}. \qquad (50)$$

Для фактора γ параметр $f_{\gamma\max} = 2$ ставится в соответствие с $\max(\gamma)$, $f_{\gamma\min} = -2$ – с $\min(\gamma)$ (рис. 8, а).

Для фактора $Q_н$ параметр $f_{Q_H\min} = -2$ ставится в соответствие с $\min(Q_н)$, $f_{Q_H\max} = 2$ – с $\max(Q_н)$ (рис. 8, б).

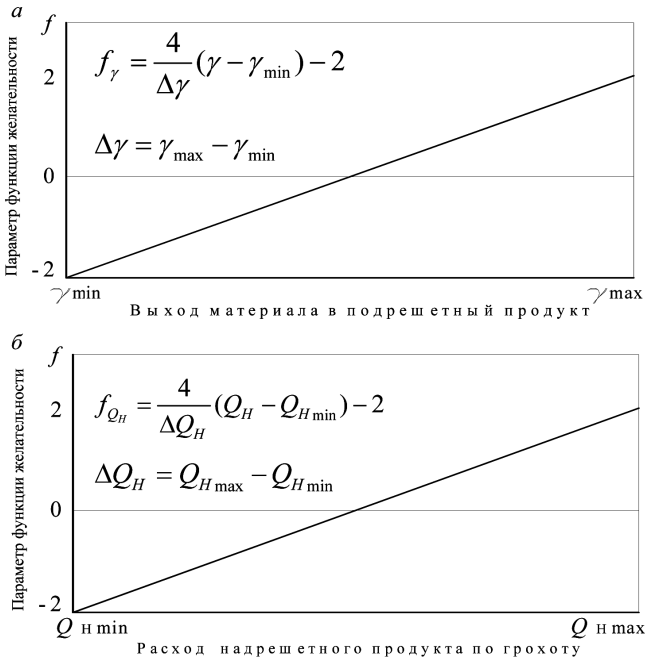

Рис. 8. Изменение параметра f от факторов оптимизации: а – выход материала в подрешетный продукт (γ); б – производительность надрешетного продукта по грохоту ($Q_н$)

Обобщенная функция желательности D (44) определяется решением частных функций d_i (45) являющимися экспоненциальными зависимостями где $f(x_i) = b_0 + b_1 x_i$. Решение функции $f(x_i)$ находятся из преобразования факторов оптимизации в соответствующую фактору функцию f.

В соответствии с условиями определения f находим коэффициенты b_0, b_1 для преобразования γ в f_γ и $Q_н$ в f_{Q_H}. Считаем $f_{\gamma\max} = 2$; $f_{\gamma\min} = -2$ и $f_{Q_H\max} = 2$; $f_{Q_H\min} = -2$.

Принимаем, что при $\gamma = \gamma_{\max}$ $f = 2$, а при $\gamma = \gamma_{\min}$ $f = -2$, так же при $Q_н = Q_{н\max}$ $f = 2$, а при $Q_н = Q_{н\min}$ $f = -2$, тогда:

для γ

$$\left.\begin{array}{l} b_0 + \gamma_{\max} b_1 = 2 \\ b_0 + \gamma_{\min} b_1 = -2 \end{array}\right\} \qquad (51)$$

для $Q_н$

$$\left.\begin{array}{l} b_0 + Q_{H\max} b_1 = 2 \\ b_0 + Q_{H\min} b_1 = -2 \end{array}\right\} \qquad (52)$$

где $\gamma_{\max}$, $Q_{н\max}$ – факторы оптимизации с наибольшим числовым значением; $\gamma_{\min}$, $Q_{н\min}$ – факторы оптимизации с наименьшим числовым значением.

Из решения системы уравнений (51, 52) определяются коэффициенты b_0, b_1 функции $f(x_i)$.

Рассчитываются частные функции желательности d_i

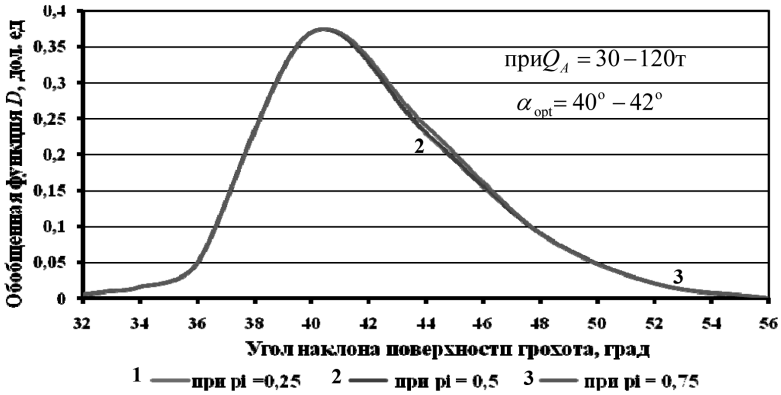

Рис. 9. График зависимости функции D от угла наклона поверхности грохота

$$d_{Q_{Hi}} = \exp\{-\exp[-f(Q_{Hi})]\}. \tag{53}$$

и

$$d_{\gamma_i} = \exp\{-\exp[-f(\gamma_i)]\}. \tag{54}$$

Определяется обобщенная функция желательности D

$$D = \sqrt{d_{Q_{Hi}} d_{\gamma_i}} = (d_{Q_{Hi}} \cdot d_{\gamma_i})^{1/2} \tag{55}$$

Оптимизация параметров грохотильно-перегрузочных пунктов производилась в два этапа.

Первым этапом являлась оптимизация угла наклона грохота ГПП, производимая по следующему алгоритму:

• в заданном интервале углов наклона грохота (φ = 36–52°) и параметров грузоподъемности автосамосвалов (Q_A = 30, 40, 75, 120 т) рассчитываются показатели процесса грохочения γ и $Q_н$;

• производится расчет частных d_i и обобщенной D функций желательности.

В качестве примера на рис. 9 представлены результаты расчета оптимизационных функций желательности для автосамосвала грузоподъемностью 75 т.

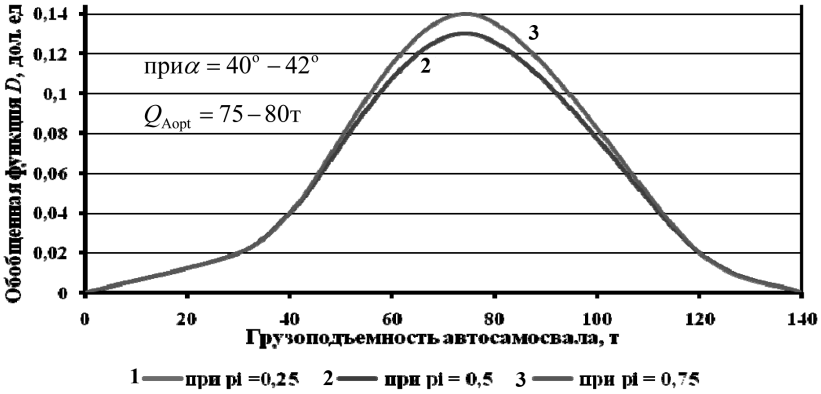

Рис. 10. График зависимости функции D от параметров грузоподъемности автосамосвалов

Вторым этапом являлась оптимизация грузоподъемности автосамосвалов, подающих горную массу на грохот.

Оптимизация производилась по параметрам грузоподъемности автосамосвалов равной 30, 40, 75 и 120 т и оптимальному углу наклона грохота φ = 40–42°, с учетом доли мелкого класса в исходном продукте p_i = 0,25, 0,5 и 0,75 дол. ед.

Оптимизационными показателями в расчетах являлись выход материала в подрешетный продукт и изменение расхода надрешетного продукта по грохоту.

На рис. 10 представлен график зависимости функции D от параметров грузоподъемности.

На основе проведенных теоретических исследований можно сделать следующие выводы:

• оптимальный объем карьерных перегрузочных складов зависит от параметров транспортных потоков «забой-склад» и «склад-обогатительная фабрика». В свою очередь плотность транспортных потоков связана с соотношением «время доставки рудного материала на склад или ОФ/время рабочего цикла автомобильного и железнодорожного транспорта»;

• резерв мощностей и производственных запасов для условий ОАО «Ураласбест» составляет 16–17%. Полученный результат позволяет утверждать следующее: обеспечение требуемого объема сырья на ОАО «Ураласбест» при существующей технологии переработки и действующей транспортной схемы в карьере может быть достигнуто резервом горнодобывающего и горнотранспортного оборудования в установленном пределе;

• эффективным методом рудоподготовки на карьерах, где проявляется взаимосвязь гранулометрического состава взорванной горной массы с ее химическим составом, является грохочение на специальных перегрузочных пунктах. Такая ресурсосберегающая технология рудоподготовки позволяет снизить транспортные расходы на перевозку некондиционной руды, производя внутреннее отвалообразование, а также повысить извлечение высококачественной руды (предобогащение) непосредственно в карьере;

• оптимальными параметрами функционирования грохотильно-перегрузочных пунктов (ГПП) по данным исследований являются следующие:

– угол наклона грохота – 40–42°;

– грузоподъемность автосамосвалов, загружающих ГПП – 75–80 т.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Гальянов А.В., Шерстянкин О.А.* К вопросу конструирования рудных потоков по заданным вероятностным характеристикам / Сборник научных трудов ИГД МЧМ СССР. – Свердловск, 1981. – № 67. – С. 66–72.

2. *Дрю Д.* Теория транспортных потоков и управление ими. – М.: Транспорт, 1972. – 424 с.

3. *Лукас В.А.* Теория автоматического управления. – М.: Недра, 1990. – 416 с.

4. *Техническая кибернетика* / Под ред. В.В. Солодовникова, кн.1. – М.: Машиностроение, 1967. – 767 с.

5. *Техническая кибернетика* / Под ред. В.В. Солодовникова, кн.2. – М.: Машиностроение, 1967. – 679 с.

6. *Рубинштейн Ю.Б., Волков Л.А.* Математические методы в обогащении полезных ископаемых . – М.: Недра, 1987. – 296 с.

7. *Маслобоев В.Г.* Математическая модель процесса грохочения // Известия вузов. Горный журнал – 1987. – № 7. – С. 109–122.

8. *Перов В.А., Андреев Е.Е., Биленко Л.Ф.* Дробление измельчение и грохочение полезных ископаемых. – М.: Недра, 1990. – 301 с.

9. *Барон Л.И.* Характеристики трения горных пород. – М.: Наука, 1967.– 206 с.
10. *Васильев М.В.* Внутрикарьерное складирование и перегрузка руд. – М.: Недра, 1968. – 184 с.
11. *Лаптев Ю.В., Гальянов А.В., Корешков Д.В.* Перспективы грохотильных схем рудоподготовки на горных предприятиях / Сборник научных трудов ИГД УрО РАН. – Екатеринбург, 2003. – Вып. 1(91). – С. 67–76.
12. *Лаптев Ю.В., Гальянов А.В.* Теоретические основы процесса сегрегации горной массы // Сборник научных трудов ИГД УрО РАН. – Екатеринбург, 2004. – Вып. 2 (92). Геотехнологические проблемы комплексного освоения недр. – С. 245–259. ГИАБ

КОРОТКО ОБ АВТОРАХ

Лаптев Юрий Викторович – доктор технических наук, зав. лабораторией,
Титов Роман Сергеевич – младший научный сотрудник,
Институт горного дела Уральского отделения РАН, e-mail: direct@igd.uran.ru.

UDC 622.013.36

OPTIMISATION OF PARAMETRES OF IS MATERIAL-INDUSTRIAL STOCKS OF AN OPEN-CAST MINE IN A MODE OF A SUSTAINABLE DEVELOPMENT OF THE MOUNTAIN ENTERPRISE

Laptev Yu.V., Doctor of Technical Sciences, Head of Laboratory,
Titov R.S., Junior Researcher,
Institute of Mining of Ural Branch of Russian Academy of Sciences, e-mail: direct@igd.uran.ru.

Results of researches on optimisation of reserves of capacities of the mountain-concentrating enterprise on Open Society «Uralasbest» example, and also perspective technologies рудоподготовки with application of grohotilno-reloading points are presented.

Key words: ore preparation, material stocks, auto correlation function, transport flow, grohotilno-reloading item, optimization.

REFERENCES

1. Gal'yanov A.V., Sherstyankin O.A. *Sbornik nauchnykh trudov IGD MChM SSSR* (Collection of scientific papers of the Institute of Mining, USSR Ministry of Ferrous Metallurgy), Sverdlovsk, 1981, no 67, pp. 66–72.
2. Dryu D. *Teoriya transportnykh potokov i upravlenie imi* (Theory of traffic streams and their control), Moscow, Transport, 1972, 424 p.
3. Lukas V.A. *Teoriya avtomaticheskogo upravleniya* (Theory of automated control), Moscow, Nedra, 1990, 416 p.
4. *Tekhnicheskaya kibernetika*, pod red. V.V. Solodovnikova, kn. 1 (Engineering cybernetics Solodovnikov V.V. (Ed.), book 1), Moscow, Mashinostroenie, 1967, 767 p.
5. *Tekhnicheskaya kibernetika*, pod red. V.V. Solodovnikova, kn. 2 (Engineering cybernetics Solodovnikov V.V. (Ed.), book 2), Moscow, Mashinostroenie, 1967, 679 p.
6. Rubinshtein Yu.B., Volkov L.A. *Matematicheskie metody v obogashchenii poleznykh iskopaemykh* (Mathematical methods in mineral dressing), Moscow, Nedra, 1987, 296 p.
7. Masloboev V.G. *Izvestiya vuzov. Gornyi zhurnal,* 1987, no 7, pp. 109–122.
8. Perov V.A., Andreev E.E., Bilenko L.F. *Droblenie izmel'chenie i grokhochenie poleznykh iskopaemykh* (Crushing, grinding and screening of minerals), Moscow, Nedra, 1990, 301 p.
9. Baron L.I. *Kharakteristiki treniya gornykh porod* (Characteristics of friction in rocks), Moscow, Nauka, 1967, 206 p.
10. Vasil'ev M.V. *Vnutrikar'ernoe skladirovanie i peregruzka rud* (Internal dumping and rehandling), Moscow, Nedra, 1968, 184 p.
11. Laptev Yu.V., Gal'yanov A.V., Koreshkov D.V. *Sbornik nauchnykh trudov IGD UrO RAN* (Collection of scientific papers of the Institute of Mining, Ural Branch of the Russian Academy of Sciences), Ekaterinburg, 2003, issue 1(91), pp. 67–76.
12. Laptev Yu.V., Gal'yanov A.V. *Sbornik nauchnykh trudov IGD UrO RAN* (Collection of scientific papers of the Institute of Mining, Ural Branch of the Russian Academy of Sciences), Ekaterinburg, 2004, issue 2 (92) *Geotekhnologicheskie problemy kompleksnogo osvoeniya nedr* (Geoengineering problems of comprehensive mineral mining), pp. 245–259.