

УДК 622.271.325:622.74

**Корнилков Сергей Викторович**  
доктор технических наук, профессор,  
главный научный сотрудник,  
Институт горного дела УрО РАН,  
620075 г. Екатеринбург,  
ул. Мамина-Сибиряка, 58  
e-mail: [kornilkov@igduran.ru](mailto:kornilkov@igduran.ru)

**Титов Роман Сергеевич**  
старший научный сотрудник,  
лаборатория управления качеством  
минерального сырья,  
Институт горного дела УрО РАН  
e-mail: [ukrigd15@mail.ru](mailto:ukrigd15@mail.ru)

### ОПТИМИЗАЦИЯ ПАРАМЕТРОВ КАРЬЕРНЫХ ГРОХОТИЛЬНО-ПЕРЕГРУЗОЧНЫХ ПУНКТОВ ДЛЯ ВЫДЕЛЕНИЯ ПРОДУКТИВНЫХ ФРАКЦИЙ МИНЕРАЛЬНОГО СЫРЬЯ\*

#### Аннотация:

Горно-геологические особенности ряда месторождений приводят к тому, что при разработке массива под воздействием буровзрывных работ степень дробления полезного ископаемого зависит от содержания в нем полезных компонентов, а химический состав руды дифференцирован по классам крупности. Установленная зависимость между качеством рудной массы и ее крупностью может быть использована для повышения эффективности технологии рудоподготовки за счет применения в карьерах грохотильно-перегрузочных пунктов (ГПП). Реализация технологии рудоподготовки на основе ГПП позволит сократить затраты на обогащение и транспортирование рудной массы за счет выделения ее некондиционной части непосредственно в карьере и исключения ее из транспортного потока на обогатительную фабрику (ОФ), где эффективное функционирование ГПП возможно за счет оптимизации ряда параметров как горно-транспортного оборудования, обслуживающего ГПП, так и самого грохота. Для определения основных параметров ГПП установлены характеристики начального движения горной массы по наклонной поверхности грохота, такие как производительность выгрузки транспортного средства на поверхность, начальная толщина слоя по питанию и скорость движения горной массы по откосу грохота. На основе представленного алгоритма рассчитаны основные характеристики процесса грохочения: величина слоя потока материала в  $i$ -м сечении грохота; скорость движения сыпучей массы по грохоту; средний размер куска в исходном материале и выход материала в подрешетный продукт. Параметры процесса грохочения определялись исходя из заданного относительного содержания класса крупности материала, подаваемого на поверхность грохота, при условии равномерного распределения его внутри класса. Выбраны оптимизируемые параметры ГПП: угол наклона грохота и линейные размеры разгрузочной площадки, зависящие от габаритов автосамосвала. Определение оптимальных параметров ГПП производилось построением обобщенной функции

DOI: 10.25635/2313-1586.2023.03.036

**Kornilkov Sergey V.**  
Doctor of Engineering Sciences, Professor,  
Chief Researcher,  
Institute of Mining, Ural Branch of RAS,  
620075 Ekaterinburg,  
58 Mamina-Sibiryaka Str.  
e-mail: [kornilkov@igduran.ru](mailto:kornilkov@igduran.ru)

**Titov Roman S.**  
Senior Researcher,  
Laboratory of Quality management,  
Institute of Mining, Ural Branch of RAS  
e-mail: [ukrigd15@mail.ru](mailto:ukrigd15@mail.ru)

### PARAMETER OPTIMIZATION FOR QUARRY BOUTING AND RELOADING POINTS FOR THE ALLOCATION OF PRODUCTIVE FRACTIONS OF MINERAL RAW MATERIALS

#### Abstract:

The mining and geological features of a number of deposits lead to the fact that during the development of the massif under the influence of drilling and blasting, the degree of crushing of the mineral depends on the content of useful components in it, and size classes differentiate the chemical composition of the ore. The established relationship between the quality of the ore mass and its size can be used to improve the efficiency of ore preparation technology due to the use of bouting and reloading points (BRP) in quarries. The implementation of the ore preparation technology based on the BRP will reduce the cost of enrichment and transportation of ore mass by allocating its substandard part directly in the quarry and by excluding it from the transport flow, where the effective functioning of the BRP is possible by optimizing some parameters of both the mining equipment servicing the BRP and the bout itself. To determine the main parameters of BRP, the characteristics of the initial movement of the rock mass along the inclined surface of the bout are established, such as the performance of uploading the vehicle on the surface, the initial thickness of the feed layer and the speed of movement of the rock mass along the slope of the bout. Based on the presented algorithm, the main characteristics of the bouting process are calculated: the size of material flow layer in the  $i$ -th section of the bout; the speed of movement of the bulk mass through the screen; the average size of the piece of the mineral and the output of the material into the sublattice product. The parameters of the screening process were determined on the basis of a given relative content of the coarseness class of the material supplied to the surface of the screen, provided its equal distribution within the class. Optimized parameters of the BRP: the angle of inclination of the screen and the linear dimensions of the unloading platform, depending on the dimensions of the dump truck. The optimal parameters of the BRP were determined by constructing a generalized desirability function for two optimized criteria: the yield of the material into the sublattice product and the consumption of the sublattice product through the screen. Based on the calculation results, optimization graphs of

\* Статья подготовлена по материалам НИР. Тема 1. Методологические основы стратегии комплексного освоения запасов месторождений твердых полезных ископаемых в динамике развития горнотехнических систем (FUWE-2022-0005), рег. № 1021062010531-8-1.5.1.

желательности для двух оптимизируемых критериев: выхода материала в подрешетный продукт и расхода надрешетного продукта по грохоту. По результатам расчета построены оптимизационные графики зависимости оптимизационной функции от угла наклона поверхности грохота и грузоподъемности разгружаемого на грохот автосамосвала. Оптимальный угол наклона грохота ГПП равен 40–42° и не зависит от гранулометрического состава исходного сырья, подаваемого на грохочение.

*Ключевые слова:* оптимизация, рудоподготовка, грохотильно-перегрузочный пункт, эффективность грохочения, параметры грохота, крупность материала, функция желательности.

*the dependence of the optimization function on the angle of inclination of the screen surface and the load capacity of the dump truck unloaded on the screen are constructed. The optimal angle of inclination for the screen of the BRP is 40°-42° and does not depend on the granulometric composition of the feedstock supplied for screening.*

*Key words:* optimization, ore preparation, boulding/screening and reloading point, screening efficiency, screening parameters, material size, desirability function.

### Введение

Предварительное обогащение твердых полезных ископаемых (ПИ) – одно из перспективных направлений совершенствования способов управления качеством минерального сырья и повышения эффективности горного производства. Одним из методов предварительного обогащения является использование ГПП в карьере (или на отвале) для предварительной крупной сортировки сырья и выделения для последующего обогащения богатых фракций [1 – 5].

Указанный способ предобогащения основан на специфическом генезисе ряда месторождений твердых ПИ, в основе которого лежит различие физико-механических свойств вмещающих пород и технологических сортов руды. Горно-геологические особенности таких месторождений, как Баженовское хризотил-асбеста (АО «Ураласбест»), Карагайское магнезита (АО «Комбинат «Магнезит»), приводят к тому, что при разработке массива под воздействием буровзрывных работ (БВР) степень дробления ПИ зависит от содержания в нем полезных компонентов, а химический состав руды дифференцирован по классам крупности.

Проведенные исследования на ряде горнодобывающих предприятий позволили установить следующие закономерности [6 – 9, 12]:

- при опробовании рудных складов ОАО «Комбинат «Магнезит» было установлено, что рудная мелочь (–15 мм) содержит вредных примесей CaO и SiO<sub>2</sub> в 2-3 раза больше, чем кусковой (+30 мм) материал. Кусковая магнезитовая рудная масса на 60 – 90 % содержит в себе магнезит высших марок, в то время как мелочь – только на 30 – 40 %;

- на ОАО «Ураласбест» общее содержание асбестового волокна в мелочи (-100 мм) в 3,7 раза выше, чем в куске (+150 мм);

- на Михайловском ГОКе было отмечено, что мелкая фракция (0 – 100 мм) на 10 - 15 % богаче крупной (+100 мм) (табл. 1).

Таким образом, установленный на предприятиях факт зависимости между качеством рудной массы и ее крупностью может быть использован для повышения эффективности технологии рудоподготовки за счет применения в карьерах ГПП. Схема рудоподготовки следующая:

- просеивание поступающей из забоев рудной массы на неподвижных или вибрационных грохотах, разделение рудного потока на богатую фракцию и некондицию;

- отгрузка обогащенного продукта для дальнейшей переработки на ДОФ, в том числе надрешетного – на АО «Комбинат «Магнезит», подрешетного – на АО «Ураласбест»;

- отгрузка некондиционной рудной массы в отвал или на склад низкокачественного сырья.

Таблица 1

## Результаты опробования железных руд Михайловского ГОКа

Тип руды	Исходная руда (400-0 мм)			Надрешетный продукт (+100 мм)			Подрешетный продукт (-100 мм)		
	Выход, т	Содержание, %		Выход, %	Содержание, %		Выход, %	Содержание, %	
		Fe	SiO <sub>2</sub>		Fe	SiO <sub>2</sub>		Fe	SiO <sub>2</sub>
Руда маршалитизированная	278	46,7	25,1	6,2	36,4	43,4	93,8	47,6	23,9
Гематито-мартитовая, маршалитизированная руда и кварциты	380	48,7	23,3	8,7	39,8	40,1	91,3	49,6	21,7
Смешанная руда	358	53,4	13,9	8,4	43,5	29,9	91,6	54,3	12,4
Карбонатизированная руда	43	51,8	10,9	10,9	51,2	10,9	89,1	52,1	10,9
Руда со значительным содержанием карбона- тизированных разностей	134	50,8	9,53	9,3	49,8	10,5	90,7	50,1	9,42
Карбонатизированная руда	140	52,7	9,88	7,1	49,2	10,3	92,7	52,9	9,83
Переотложенная руда	357	45,2	12,7	10,2	35,7	24,6	89,8	46,2	11,3

Предложенная ресурсосберегающая технология рудоподготовки позволит сократить затраты на обогащение и транспортирование за счет выделения некондиционной руды непосредственно в карьере и исключения ее из транспортного потока на ОФ.

Для эффективного функционирования ГПП в карьере необходима оптимизация ряда параметров как горно-транспортного оборудования, обслуживающего ГПП, так и самого грохота, в том числе длины грохота; размера щели просеивающей поверхности; коэффициента живого сечения и угла наклона грохота.

#### Результаты

Первым этапом оптимизации основных параметров грохота является определение характеристик начального движения горной массы (ГМ) на его поверхности, таких как производительность выгрузки транспортного средства на поверхность грохота  $Q_0$  и начальные толщина слоя по питанию  $h_0$  и скорость движения горной массы по откосу грохота  $v_0$ .

Начальную скорость движения горной массы по наклонной поверхности грохота при выгрузке автосамосвала можно установить из следующего выражения [11]:

$$v_0 = \sqrt{(v \cos \theta)^2 + (gt + v \sin \theta)^2 [(1 - \lambda_r) \cos(\beta - \alpha)]}, \quad (1)$$

где  $v$  – скорость сползания горной массы при подъеме кузова а/с, м/с;

$\theta$  – угол сползания (угол при котором начинается движение горной массы в кузове а/с при ее разгрузке), град;

$g$  – ускорение свободного падения, м/с<sup>2</sup>;

$t$  – параметр времени выгрузки, с;  
 $\lambda_T$  – коэффициент мгновенного трения при ударе (0,4), дол. ед.;  
 $\beta$  – угол падения (встречи горной массы с наклонной поверхностью грохота), отсчитываемый от линии горизонта, град.

Производительность выгрузки автосамосвала может быть определена как величина исходного потока горной массы при его выгрузке:

$$Q_o = \frac{G_{a/c}}{t_B}, \quad (2)$$

где  $G_{a/c}$  – вместимость кузова а/с, м<sup>3</sup>;

$t_B$  – продолжительность операции выгрузки, с.

Начальная толщина слоя по питанию определяется следующим выражением:

$$h_o = \bar{d}_o B = \bar{d}_o \frac{Q_o}{Q_o^{\min}}, \quad (3)$$

где  $B$  – коэффициент, связанный с производительностью выгрузки автосамосвала, ед.;

$\bar{d}_o$  – средний размер куска в исходном материале, м;

$Q_o^{\min}$  – производительность выгрузки принятого автосамосвала с наименьшей грузоподъемностью (30 т) при  $B=1$  м<sup>3</sup>/с.

В табл. 2 приведены значения исходных данных при подаче горной массы на поверхность грохота в зависимости от параметров автомобильного транспорта [5 – 8, 11].

Таблица 2

#### Кинематические характеристики выгрузки автосамосвала на поверхность грохота

Грузоподъемность автосамосвала, т	Вместимость кузова, м <sup>3</sup>	Ширина кузова $a$ , м	Производительность выгрузки $Q_o$ , м <sup>3</sup> /с	Начальная скорость движения ГМ по откоосу $v_o$ , м/с
30	18	3,5	0,9	2,50
40	26	3,6	1,3	2,60
75	46	5,4	2,3	3,15
120	61	6,2	3,1	3,5

Важным параметром, характеризующим процесс грохочения, является величина слоя потока материала [9] в  $i$ -м сечении грохота  $h_i$ , рассчитываемая по модели В.Г. Маслобоева [10]:

$$h_i = \frac{h_o v_o}{v_i} \left\{ 1 - \left[ p_i \left[ \frac{\lambda_{жс} \mu \sqrt{(g \cos \alpha)}}{3 \cdot k \cdot \sqrt{h_o v_o}} (v_i^{1,5} - v_o^{1,5}) \right] \right] \right\}^2, \quad (4)$$

где  $v_o$  – начальная скорость движения сыпучей массы, м/с;

$v_i$  – скорость движения сыпучей массы по грохоту, м/с;

$h_o$  – начальная толщина слоя материала по питанию (связана со средним размером куска подаваемой на грохот горной массы), м;

$p_i$  – доля мелкого класса в исходном продукте, доли ед.;

$\lambda_{жс}$  – коэффициент живого сечения;

$\mu$  – коэффициент затрудненности просеивания, зависящий от физико-механических свойств материала и разрешающей способности сита (для рудной горной массы  $\mu$  можно принять равным 0,05);

$\alpha$  – угол наклона поверхности грохота, град.;

$$k = g[\sin \alpha - f'_d(1 - \lambda_{\text{жс}}\mu^2) \cos \alpha], \quad (5)$$

где  $f'_d$  – коэффициент внешнего трения движения горной породы в сыпучем состоянии по наклонной поверхности (учитывает свойства просеиваемого минерального материала),  $f'_d = \operatorname{tg} \rho'$ ;

$\rho'$  – угол внешнего трения разрыхленной породы, равный углу естественного откоса  $\varphi = 36^\circ$ .

Скорость движения сыпучей массы по грохоту рассчитывается по формуле [11]:

$$v_i = \sqrt{v_0^2 + 2ky} = \sqrt{v_0^2 + 2yg[\sin \alpha - f'_d(1 - \lambda_{\text{жс}}\mu^2) \cos \alpha]}, \quad (6)$$

где  $y$  – текущая координата по длине грохота, м.

Коэффициент живого сечения рассчитывается по следующей формуле:

$$\lambda_{\text{жс}} = \frac{S_{\text{ж}}}{S_{\text{общ}}} = \frac{d_p}{d_p + b_p}, \quad (7)$$

где  $S_{\text{ж}}$  – площадь свободного отверстия грохота, через которое непосредственно происходит отсеивание материала,  $\text{м}^2$ ;

$S_{\text{общ}}$  – площадь ячейки грохочения с учетом толщины сетки (решетки) грохота,  $\text{м}^2$ ;

$d_p$  – размер щели (связан с размером задаваемого куска подрешетного продукта), м;

$b_p$  – ширина рельса, м.

Параметры процесса грохочения на ГПП определялись исходя из заданного относительного содержания класса крупности материала, подаваемого на поверхность грохота, при условии равномерного распределения его внутри класса. Для расчетов задано два класса крупности, в том числе 0 – 150 мм – нижний класс (подрешетный) и 150 – 1000 мм – верхний класс (надрешетный), с долями относительного содержания по мелкому классу в исходном подаваемом материале  $p_{\text{н}} = 0,25, 0,5$  и  $0,75$ .

Таким образом, средний размер куска в исходном материале определялся как

$$\bar{d}_0 = \frac{\bar{d}_{\text{н}} \cdot p_{\text{ин}} + \bar{d}_{\text{в}} \cdot p_{\text{ив}}}{p_{\text{ин}} + p_{\text{ив}}}, \quad (8)$$

где  $\bar{d}_{\text{н}}$  – средний размер куска по нижнему классу, м;

$\bar{d}_{\text{в}}$  – средний размер куска по верхнему классу, м;

$p_{\text{ин}}$  – доля мелкого класса в исходном материале (0,25, 0,5, 0,75), доли ед.;

$p_{\text{ив}}$  – доля крупного класса в исходном материале, доли ед.,  $p_{\text{ив}} = 1 - p_{\text{ин}}$ .

Эффективность грохочения связана с содержанием подрешетного продукта в исходном материале и выходом подрешетного продукта [11–13]. Выход надрешетного и подрешетного продуктов по длине грохота определяется величиной  $h_i$ . Выход материала в подрешетный продукт определяется из следующего выражения [5, 11]:

$$\gamma_i = 1 - \frac{Q_{\text{ни}}}{Q_{\text{о}}^{\text{г}}} = 1 - \frac{h_i v_i a}{h_0 v_0 a}, \quad (9)$$

где  $Q_{\text{ни}}$  – расход по надрешетному продукту в  $i$ -м сечении грохота,  $\text{м}^3/\text{с}$ ;

$Q_{\text{о}}^{\text{г}}$  – производительность грохота по питанию,  $\text{м}^3/\text{с}$ ;

$a$  – ширина просеивающей поверхности грохота, соизмеримая с шириной  $h_i$  (ширина кузова автосамосвала), м.

Конструктивные параметры грохота задаются исходя из следующего:

– размер щели грохота  $d_p$  определяется в соответствии с заданным гранулометрическим составом подаваемой горной массы на его поверхность по нижнему классу крупности (подрешетный продукт). В расчетах нижний класс 0 – 150 мм, соответственно, принимаем по максимальному куску класса  $d^{150} = d_p = 0,15$  м;

- ширина элемента поверхности  $b_p$  принимается исходя из принятой конструкции просеивающей поверхности грохота,  $b_p = 150 \text{ мм} = 0,15 \text{ м}$ ;
- конечная длина грохота равна стандартной длине рельса 25 м. Для расчета параметров процесса грохочения задано шесть точек координат по длине грохота, равных  $y = 0, 5, 10, 15, 20, 25 \text{ м}$ , соответственно;
- угол наклона грохота  $\alpha$  принимается в пределах изменения 35 – 55 град. Для расчета приняты углы  $\alpha = 36, 40, 44, 48, 52^\circ$ , соответственно.

На рис. 1, 2 приведены графики, построенные по результатам расчетов изменения толщины слоя потока материала на грохоте  $h_i$  и выхода материала в подрешетный продукт  $\gamma_i$  в  $i$ -м сечении в зависимости от изменения текущей координаты  $y$  прохождения материала по длине грохота.

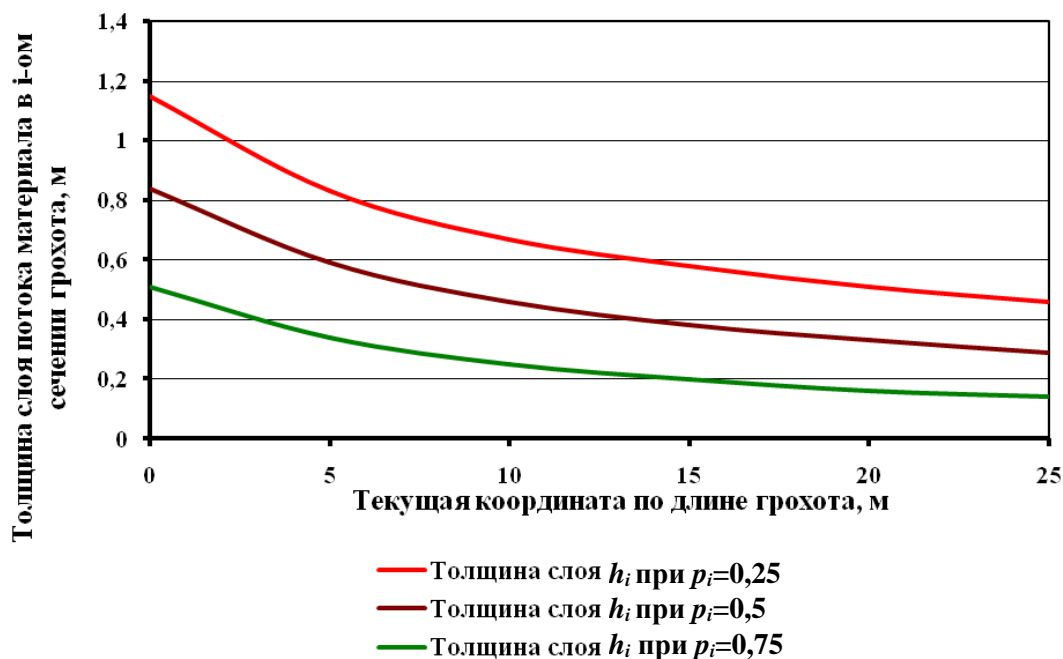


Рис.1. График изменения толщины слоя  $h_i$  по длине грохота при  $\alpha = 40^\circ$  и  $Q_a = 75 \text{ т}$

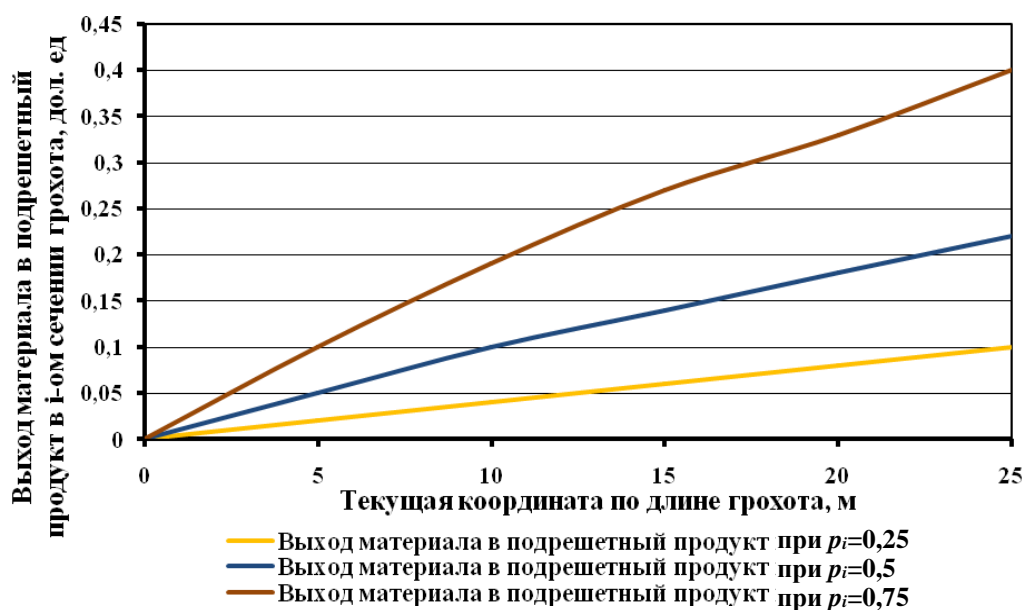


Рис. 2. График выхода материала в подрешетный продукт  $\gamma$  по длине грохота при  $\alpha = 40^\circ$  и  $Q_a = 75 \text{ т}$

Для определения оптимальных параметров грохотильно-перегрузочных пунктов принята расчетная схема построения обобщенной функции желательности [15–18].

В качестве оптимизируемых принимаются два критерия (параметры функции желательности):

- выход материала в подрешетный продукт  $\gamma$ ;
- расход надрешетного продукта по грохоту  $Q_n$ .

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  $d$ ;
- вычисления обобщенной функции желательности  $D$ .

Частная функция желательности имеет экспоненциальную зависимость и следующий вид [14]:

$$d = \exp \{ -\exp [-f(x)] \}. \quad (10)$$

Обобщенная функция желательности определяется следующим соотношением:

$$D = \sqrt[n]{d_1 d_2 \dots d_n} = \left( \prod_{i=1}^n d_i \right)^{1/n}, \quad (11)$$

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  $D = 1$ . Соответственно,  $D \leq 1$ . Наилучшему результату оптимизируемых параметров соответствует максимальное значение функции  $D_{\max}$ .

Оптимизация параметров грохотильно-перегрузочного пункта производилась двумя этапами.

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

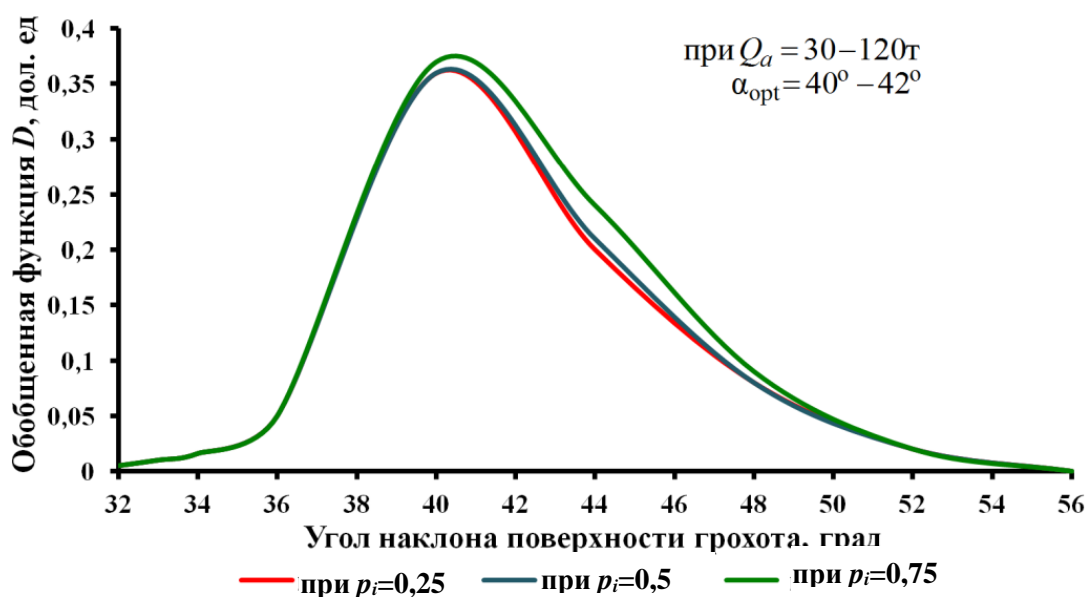
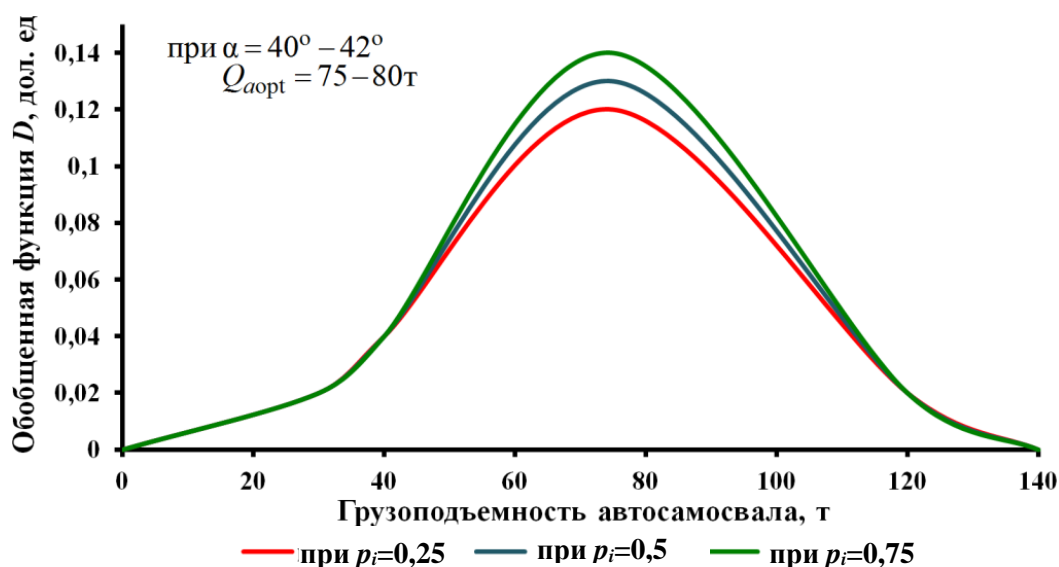
- в заданном интервале углов наклона грохота ( $\alpha = 36^\circ$ – $52^\circ$ ) и грузоподъемности автосамосвалов ( $Q_a = 30, 40, 75, 120$  т) рассчитываются показатели процесса грохочения  $\gamma$  и  $Q_n$ ;

- производится расчет частных  $d_i$  и обобщенной  $D$  функций желательности.

Вторым этапом оптимизации параметров ГПП являлся расчет функции  $D$ , определяющей оптимальную грузоподъемность подающих горную массу на грохот автосамосвалов. В качестве оптимизационного параметра автотранспортного оборудования, разгружающего горную массу, служат скорость и производительность выгрузки на грохот (см. табл. 2).

Оптимизация производилась для грузоподъемности автосамосвалов, равной 30, 40, 75 и 120 т, и установленного в первом этапе оптимального угла наклона грохота  $\alpha$  с учетом доли мелкого класса в исходном продукте  $p_i = 0,25, 0,5$  и  $0,75$  доли ед. Оптимизационными показателями в расчетах являлись выход материала в подрешетный продукт  $\gamma$  и изменение расхода надрешетного продукта  $Q_n$  по грохоту.

По результатам расчета построены оптимизационные графики зависимости функции  $D$  от угла наклона поверхности грохота  $\alpha$  и грузоподъемности автосамосвала, представленные на рис. 3, 4.

Рис. 3. График зависимости функции  $D$  от угла наклона поверхности грохота  $\alpha$ Рис. 4. График зависимости функции  $D$  от параметров грузоподъемности автосамосвала

### Выводы

На основе анализа результатов исследований содержания ценных компонентов (волокон хризотил-асбеста, вредных примесей в составе магнезита и др.) в кусках дробленой после БВР руды установлено, что на отдельных характерных месторождениях содержание ценных компонентов в кусках руды зависит от ее фракционного состава.

Предложена технология предварительного обогащения ПИ указанных ранее месторождений, основанная на грохочении в карьере взорванной рудной массы на специальных ГПП, которая позволит разделить рудный поток на богатую фракцию (например – надрешетную на АО «Комбинат «Магнезит», подрешетную – на АО «Ураласбест») и некондицию (в отвал или склад).

На основе разработанной методики оптимизации параметров карьерных ГПП установлено, что



- оптимальный угол наклона грохота ГПП равен  $40 - 42^\circ$  и не зависит от гранулометрического состава исходного сырья, подаваемого на грохочение;
- оптимальные параметры грузоподъемности автосамосвалов, загружающих ГПП, равны 75 – 80 т и не зависят от гранулометрического состава исходного сырья, подаваемого на грохочение;
- оптимальные параметры автотранспорта определяют линейные размеры разгрузочных площадок в верхней части ГПП.

Предложенная технология рудоподготовки позволит сократить затраты на обогащение и транспортирование за счет выделения некондиционной руды непосредственно в карьере и исключения ее из транспортного потока на ОФ.

### Список литературы

1. Яковлев В.Л., Корнилков С.В., Соколов И.В., 2018. *Инновационный базис стратегии комплексного освоения ресурсов минерального сырья: монография*; под редакцией В.Л. Яковлева. Екатеринбург: ИГД УрО РАН, 360 с.
2. Яковлев В.Л., Кантемиров В.Д., Яковлев А.М., Титов Р.С., 2019. Основные направления совершенствования методов рудоподготовки минерального сырья. *Проблемы недропользования*, № 3, С. 95 – 106. <https://doi.org/10.25635/2313-1586.2019.03.095>
3. Кантемиров В.Д., 2014. Технологические особенности освоения новых сырьевых баз. *Горный информационно-аналитический бюллетень*, № 6, С. 369 – 373.
4. Кантемиров В.Д., 2015. Технологические аспекты разработки в одном карьере нескольких видов полезных ископаемых. *Маркшейдерия и недропользование*, № 5, С. 22 - 30.
5. Васильев М.В., 1968. *Внутрикарьерное складирование и перегрузка руд*. Москва: Недра, 184 с.
6. Гальянов А.В., Лаптев Ю.В., 1999. *Рудоподготовка на карьерах*. Екатеринбург: ИГД УрО РАН, 426 с.
7. Гальянов А.В., Лаптев Ю.В., Блинов А.Н., Афонин Ю.А., Мосейкин Д.Е., 2000. *Совершенствование технологии отбора и подготовки проб магнетитового сырья в рудных потоках ОАО «Комбинат «Магnezит»*: отчет / ИГД УрО РАН; рук. Гальянов А.В., Лаптев Ю.В. Екатеринбург, 48 с.
8. Лаптев Ю.В., Гальянов А.В., Корешков Д.В., 2003. Перспективы грохотильных схем рудоподготовки на горных предприятиях. *Сб. науч. трудов ИГД УрО РАН*, Вып. 1(91), С. 67– 76.
9. Гальянов А.В., Лаптев Ю.В., Корешков Д.В., Клочихина Т.И., 2003. *Техно-экономическое обоснование грохотильной схемы рудоподготовки в карьере ОАО «Ураласбест»*: отчет ИГД УрО РАН; рук. Гальянов А.В., Лаптев Ю.В. Екатеринбург, 57 с.
10. Вайсберг Л.А., Рубисов Д.Г., 1988. Массово-балансовая модель вибрационного грохочения сыпучих материалов. *Обогащение руд*, № 5, С. 5 – 8.
11. Маслобоев В.Г., 1987. Математическая модель процесса грохочения. *Известия вузов. Горный журнал*, № 7, С. 109 – 122.
12. Лаптев Ю.В., 2007. *Геометризация процесса сегрегации скальных пород по крупности при формировании отвалов*: дис. ... д-ра техн. наук. Екатеринбург, 303 с.
13. Андреев С.Е., Перов В.А., Зверевич В.В., 1980. *Дробление, измельчение и грохочение полезных ископаемых*. Москва: Недра, 415 с.
14. Барон Л.И., 1967. *Характеристики трения горных пород*. Москва: Наука, 206 с.
15. Рубинштейн Ю.Б., Волков Л.А., 1987. *Математические методы в обогащении полезных ископаемых*. Москва: Недра, 296 с.
16. Андреев Е.Е., Биленко Л.Ф., Петров В.А., 1990. *Дробление, измельчение и грохочение полезных ископаемых*. Москва: Недра, 301 с.

17. Рузинов Л.П., Слободчикова Р.И., 1980. *Планирование эксперимента в химии и химической технологии*. Москва: Химия, 280 с.
18. Ахназарова С.Л., Кафаров В.В., 1978. *Оптимизация эксперимента в химии и химической технологии*. Москва: Высшая школа, 319 с.

### References

1. Yakovlev V.L., Kornilkov S.V., Sokolov I.V., 2018. Innovatsionnyi bazis strategii kompleksnogo osvoeniya resursov mineral'nogo syr'ya: monografiya [Innovation basis of the strategy of integrated development of mineral resources: monograph]; pod redaktsiei V.L. Yakovleva. Ekaterinburg: IGD UrO RAN, 360 p.
2. Yakovlev V.L., Kantemirov V.D., Yakovlev A.M., Titov R.S., 2019. Osnovnye napravleniya sovershenstvovaniya metodov rudopodgotovki mineral'nogo syr'ya [The main directions for improving the methods of ore preparation of mineral raw materials]. Problemy nedropol'zovaniya, № 3, P. 95 – 106. <https://doi.org/10.25635/2313-1586.2019.03.095>
3. Kantemirov V.D., 2014. Tekhnologicheskie osobennosti osvoeniya novykh syr'evykh baz [Technological features of the development of new raw materials bases]. Gornyi informatsionno-analiticheskii byulleten', № 6, P. 369 – 373.
4. Kantemirov V.D., 2015. Tekhnologicheskie aspekty razrabotki v odnom kar'ere neskol'kikh vidov poleznykh iskopaemykh [Technological aspects of the development of several types of minerals in one quarry]. Marksheideriya i nedropol'zovanie, № 5, P. 22-30.
5. Vasil'ev M.V., 1968. Vnutrikar'ernoie skladirovanie i peregruzka rud [Intra-quarry storing and transshipment of ores]. Moscow: Nedra, 184 p.
6. Gal'yanov A.V., Laptev Yu.V., 1999. Rudopodgotovka na kar'erakh [Ore preparation at quarries]. Ekaterinburg: IGD UrO RAN, 426 p.
7. Gal'yanov A.V., Laptev Yu.V., Blinov A.N., Afonin Yu.A., Moseikin D.E., 2000. Sovershenstvovanie tekhnologii otbora i podgotovki prob magnezitovogo syr'ya v rudnykh potokakh OAO "Kombinat "Magnezit": otchet [Improvement of the technology of samples selection and preparation of magnesite raw materials in ore flows of JSC "Magnezit Combine": report] / IGD UrO RAN; ruk. Gal'yanov A.V., Laptev Yu.V. Ekaterinburg, 48 s.
8. Laptev Yu.V., Gal'yanov A.V., Koreshkov D.V., 2003. Perspektivy grokhotil'nykh skhem rudopodgotovki na gornykh predpriyatiyakh [Prospects of screening schemes of ore preparation at mining enterprises]. Sb. nauch. trudov IGD UrO RAN, Vyp. 1(91), P. 67– 76.
9. Gal'yanov A.V., Laptev Yu.V., Koreshkov D.V., Klochikhina T.I., 2003. Tekhniko-ekonomicheskoe obosnovanie grokhotil'noi skhemy rudopodgotovki v kar'ere OAO "Uralasbest" [Feasibility study of the screening scheme of ore preparation in the quarry of JSC "Uralasbest"]: otchet IGD UrO RAN; ruk. Gal'yanov A.V., Laptev Yu.V. Ekaterinburg, 57 p.
10. Vaisberg L.A., Rubisov D.G., 1988. Massovo-balansovaya model' vibratsionnogo grokhocheniya sypuchikh materialov [Mass-balance model of vibrating screening of bulk materials]. Obogashchenie rud, № 5, P. 5 – 8.
11. Masloboev V.G., 1987. Matematicheskaya model' protsessa grokhocheniya. Izvestiya vuzov [Mathematical model of the screening process.]. Gornyi zhurnal, № 7, P. 109 - 122.
12. Laptev Yu.V., 2007. Geometrizatsiya protsessa segregatsii skal'nykh porod po krupnosti pri formirovanii otvalov [Geometrization of the process of rocks segregation by size during the formation of dumps]: dis. ... d-ra tekhn. nauk. Ekaterinburg, 303 p.
13. Andreev S.E., Perov V.A., Zverevich V.V., 1980. Droblenie, izmel'chenie i grokhochenie poleznykh iskopaemykh [Crushing, grinding and screening of minerals]. Moscow: Nedra, 415 p.
14. Baron L.I., 1967. Kharakteristiki treniya gornykh porod [Friction characteristics of rock]. Moscow: Nauka, 206 s.

15. Rubinshtein Yu.B., Volkov L.A., 1987. Matematicheskie metody v obogashchenii poleznykh iskopaemykh [Mathematical methods in minerals processing]. Moscow: Nedra, 296 p.

16. Andreev E.E., Bilenko L.F., Petrov V.A., 1990. Droblenie, izmel'chenie i grokhochenie poleznykh iskopaemykh [Crushing, grinding and screening of minerals]. Moscow: Nedra, 301 p.

17. Ruzinov L.P., Slobodchikova R.I., 1980. Planirovanie eksperimenta v khimii i khimicheskoi tekhnologii [Planning of an experiment in chemistry and chemical technology]. Moscow: Khimiya, 280 s.

18. Akhnazarova S.L., Kafarov V.V., 1978. Optimizatsiya eksperimenta v khimii i khimicheskoi tekhnologii [Optimization of an experiment in chemistry and chemical technology]. Moscow: Vysshaya shkola, 319 p.