УДК 622.271.325:622.74 https://doi.org/10.21440/2307-2091-2020-3-107-114

Оптимизация параметров карьерных грохотильно-перегрузочных пунктов[1]

Валерий Даниилович КАНТЕМИРОВ*,
Роман Сергеевич ТИТОВ**

Институт горного дела УрО РАН, Екатеринбург, Россия

Аннотация

Введение. 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 ОФ, где эффективное функционирование ГПП возможно за счет оптимизации ряда параметров как горнотранспортного оборудования, обслуживающего ГПП, так и самого грохота.

Результаты. 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 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.

Выводы. 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.

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 грохотильно-перегрузочных пунктов в карьере (или на отвале) для предварительной крупной сортировки сырья и выделения для последующего обогащения богатых фракций [1–4].

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

[1]Статья подготовлена по материалам НИР, выполняемой по программе ФНИ государственных академий наук. Тема 1. Методы учета переходных процессов технологического развития при освоении глубокозалегающих сложноструктурных месторождений полезных ископаемых. (№ 0405-2019-0005).

✉ukrkant@mail.ru
https://orcid.org/0000-0001-6486-2740
**ukrigd15@mail.ru
https://orcid.org/0000-0002-3569-2743

компонентов, а химический состав руды дифференцирован по классам крупности.

Проведенные исследования на ряде горнодобывающих предприятий позволили установить следующие закономерности [5–8]:

– при опробовании рудных складов ОАО «Комбинат «Магнезит» было установлено, что рудная мелочь (–15 мм) содержит вредных примесей CaO и SiO_2 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).

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 грохотильно-перегрузочных пунктов (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.

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 грохотильно-перегрузочных пунктов (ГПП) в карьере необходима оптимизация ряда параметров как горнотранспортного 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. В таблице приведены значения исходных данных при подаче горной массы на поверхность грохота в зависимости от параметров автомобильного транспорта [5–8].

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]:

$$h_i = \frac{h_0 v_0}{v_i}\left\{1-\left\langle p_i\left[\frac{\lambda_{ж.с}\mu\sqrt{(g\cos\alpha)}}{3k\sqrt{h_0 v_0}}\left(v_i^{1,5}-v_0^{1,5}\right)\right]\right\rangle\right\}^2,$$

где v_0 – начальная скорость движения сыпучей массы, м/с; v_i – скорость движения сыпучей массы по грохоту, м/с; h_0– 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.; $\lambda_{ж.с}$ – коэффициент живого сечения; μ – коэффициент затрудненности просеивания, зависящей от физико-механических свойств материала и разрешающей способности сита (для рудной горной массы μ можно принять равным 0,05); g – ускорение свободного падения, м/с^2; α – угол наклона поверхности грохота, град.

$$k = g\left[\sin\alpha - f_д'\left(1-\lambda_{ж.с}\mu^2\right)\cos\alpha\right],$$

где $f_д'$ – коэффициент внешнего трения движения горной породы в сыпучем состоянии по наклонной поверхности (учитывает свойства просеиваемого минерального материала), $f_д' = \mathrm{tg}\,\rho'$, ρ' – угол внешнего трения разрыхленной породы, равный углу естественного откоса φ = 36°.

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

$$v_i = \sqrt{v_0^2+2ky} = \sqrt{v_0^2+2yg\left[\sin\alpha - f_д'\left(1-\lambda_{ж.с}\mu^2\right)\cos\alpha\right]},$$

где y – текущая координата по длине грохота, м.

Коэффициент живого сечения рассчитывается по следующей формуле:

$$\lambda_{ж.с} = \frac{S_ж}{S_{общ}} = \frac{d_р}{d_р+b_р},$$

где $S_ж$ – площадь свободного отверстия грохота, через которое непосредственно происходит отсеивание материала, м^2; $S_{общ}$ – площадь ячейки грохочения с учетом

Кинематические характеристики выгрузки автосамосвала на поверхность грохота.
Kinematic characteristics of dump truck unloading onto the screener surface.

Грузоподъемность автосамосвала, т	Вместимость кузова, м^3	Ширина кузова *a*, м	Производительность выгрузки Q_0, м^3/с	Начальная скорость движения ГМ по откосу v_0, 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

толщины сетки (решетки) грохота, м²; $d_р$ – размер щели (связан с размером задаваемого куска подрешетного продукта), м; $b_р$ – ширина рельса, м.

Начальная толщина слоя по питанию определяется следующим выражением:

$$h_0 = \bar{d}_0 B = \bar{d}_0 \frac{Q_0}{Q_0^{\min}},$$

где B – коэффициент, связанный с производительностью выгрузки автосамосвала, ед.; $\bar{d}_0$ – средний размер куска в исходном материале, м; м³/с; $Q_0^{\min}$ – производительность выгрузки принятого автосамосвала с наименьшей грузоподъемностью (30 т) при B =1 м³/с.

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 $p_н$ 0,25, 0,5 и 0,75.

Таким образом, средний размер куска в исходном материале определялся как:

$$\bar{d}_0 = \frac{\bar{d}_н p_{iн} + \bar{d}_в p_{iв}}{p_{iн} + p_{iв}},$$

где $\bar{d}_i$ – средний размер куска по нижнему классу, м; $\bar{d}_в$ – средний размер куска по верхнему классу, м; $p_{iн}$ – доля мелкого класса в исходном материале (0,25, 0,5, 0,75), доли ед.; $p_{iв}$ – доля крупного класса в исходном материале, доли ед., $p_{iв} = 1 - p_{iн}$.

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]:

$$\gamma_i = 1 - \frac{Q_{нi}}{Q_0^г} = 1 - \frac{h_i v_i a}{h_0 v_0 a},$$

где $Q_{нi}$ – расход по надрешетному продукту в i-м сечении грохота, м³/с; $Q_0^а$ — производительность грохота по питанию, м³/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 $d_р$ 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 $d^{150} = d_р$ = 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, равных y = 0, 5, 10, 15, 20, 25 м соответственно.

– угол наклона грохота α принимается в пределах изменения 35–55 град. Для расчета приняты углы α = 36°, 40°, 44°, 48°, 52° 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 γ_i в i-м сечении в зависимости от изменения текущей координаты y прохождения материала по длине грохота.

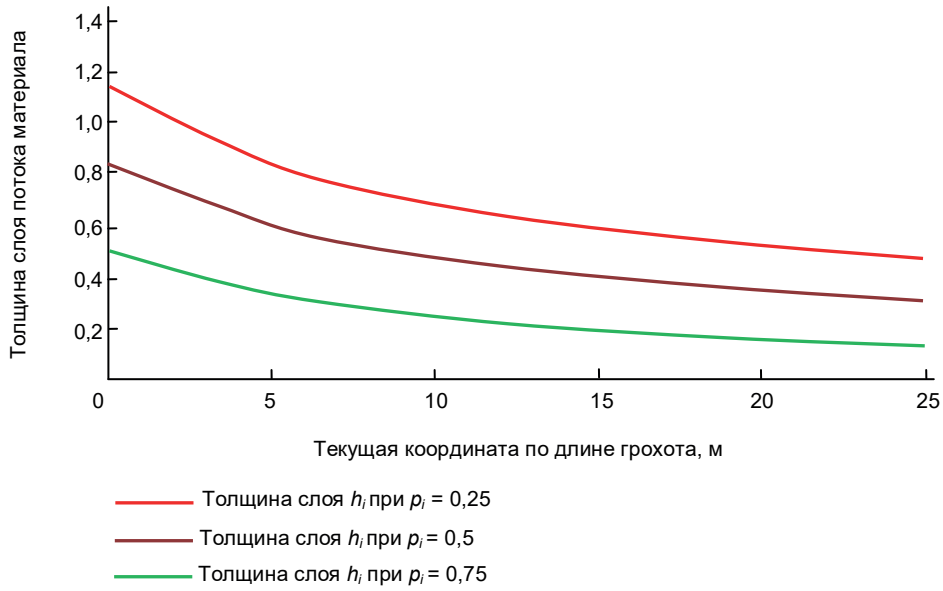

Рисунок 1. График изменения толщины слоя h_i по длине грохота при α = 40° и $Q_а$ = 75 т.
Figure 1. Graph of changes in the thickness of the h_i layer along the screener length at α = 40° and $Q_а$ = 75 tons.

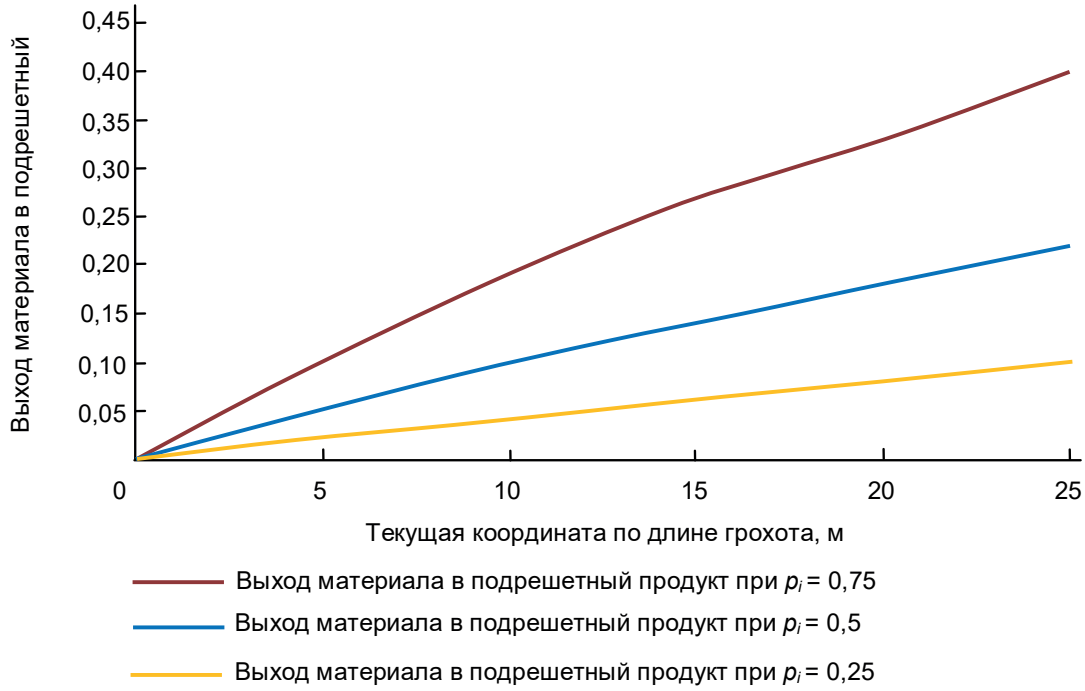

Рисунок 2. График выхода материала в подрешетный продукт γ по длине грохота при α = 40° и $Q_а$ = 75 т.
Figure 2. The graph of the material output into the screen throughs γ along the length of the screener at α = 40° and $Q_а$ = 75 tons.

Для определения оптимальных параметров грохотильно-перегрузочных пунктов принята расчетная схема построения обобщенной функции желательности [14–17].

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

– выход материала в подрешетный продукт γ;

– расход надрешетного продукта по грохоту $Q_н$.

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]:

$$d = \exp\left\{-\exp\left[-f(x)\right]\right\}.$$

Обобщенная функции желательности определяется следующим соотношением:

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

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 (α = 36°–52°) и грузоподъемности автосамосвалов ($Q_а$ = 30, 40, 75, 120 т) рассчитываются показатели процесса грохочения γ и $Q_н$;

– 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 (таблица).

Оптимизация производилась для грузоподъемности автосамосвалов, равной 30, 40, 75 и 120 т, и установленного в первом этапе оптимального угла наклона грохота α 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 γ и изменение расхода надрешетного продукта $Q_н$ по грохоту.

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

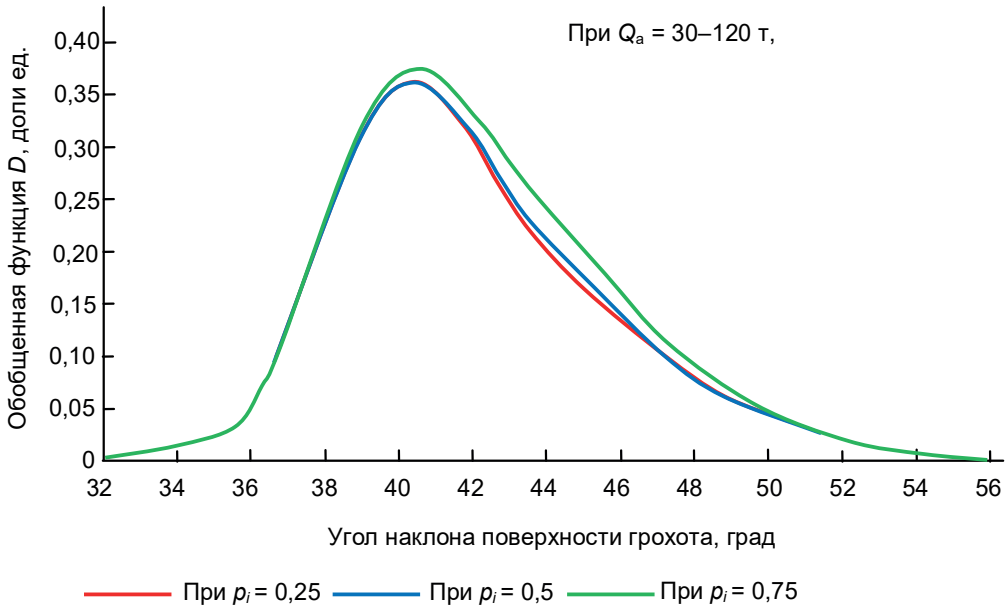

Рисунок 3. График зависимости функции *D* от угла наклона поверхности грохота α.
Figure 3. The graph of the function *D* versus the angle of inclination of the screener surface α.

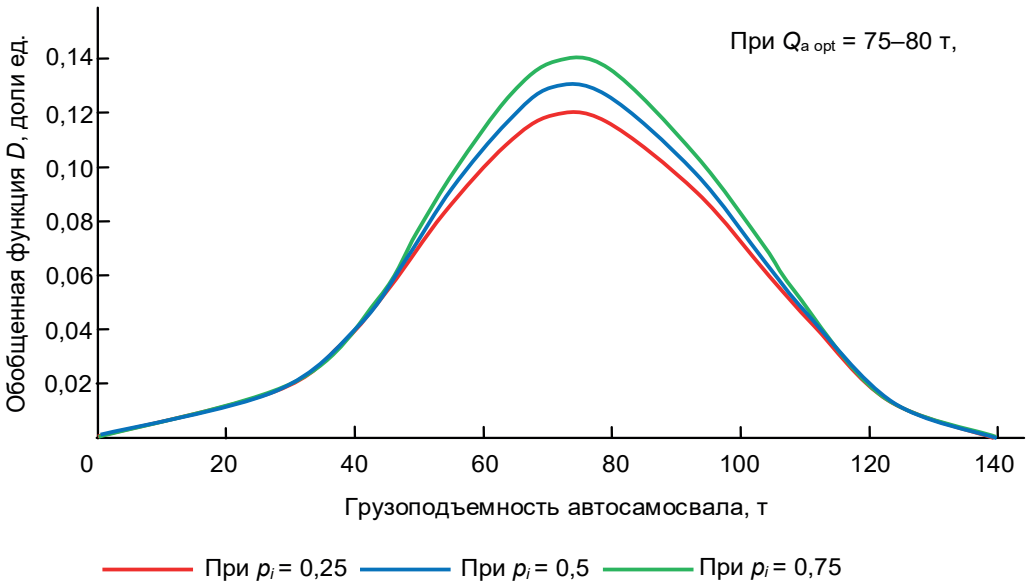

Рисунок 4. График зависимости функции *D* от параметров грузоподъемности автосамосвала.
Figure 4. Graph of dependence of function *D* on parameters of dump truck load capacity.

Выводы

На основе анализа результатов исследований содержания ценных компонентов (волокон хризотил-асбеста, вредных примесей в составе магнезита и др.) в кусках дробленной после БВР руде 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 грохотильно-перегрузочных пунктах (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 грохотильно-перегрузочных пунктов (ГПП) установлено, что:

– оптимальный угол наклона грохота ГПП равен 40°–42° 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.

ЛИТЕРАТУРА

1. Яковлев В. Л., Кантемиров В. Д., Яковлев А. М., Титов Р. С. Основные направления совершенствования методов рудоподготовки минерального сырья // Проблемы недропользования. 2019. № 3. С. 95–106. https://doi.org/10.25635/2313-1586.2019.03.095
2. Кантемиров В. Д. Технологические особенности освоения новых сырьевых баз // ГИАБ. 2014. № 6. С. 369–373.
3. Кантемиров В. Д. Технологические аспекты разработки в одном карьере нескольких видов полезных ископаемых // Маркшейдерия и недропользование. 2015. № 5. С. 22–30.
4. Васильев М. В. Внутрикарьерное складирование и перегрузка руд. М.: Недра, 1968. 184 с.
5. Гальянов А. В., Лаптев Ю. В. Рудоподготовка на карьерах. Екатеринбург: ИГД УрО РАН, 1999. 426 с.
6. Гальянов А. В., Лаптев Ю. В., Блинов А. Н., Афонин Ю. А., Мосейкин Д. Е. Совершенствование технологии отбора и подготовки проб магнезитового сырья в рудных потоках ОАО «Комбинат «Магнезит»: отчет / ИГД УрО РАН; рук. Гальянов А. В., Лаптев Ю. В. Екатеринбург, 2000. 48 с.
7. Лаптев Ю. В., Гальянов А. В., Корешков Д. В. Перспективы грохотильных схем рудоподготовки на горных предприятиях // Сб. науч. трудов ИГД УрО РАН. 2003. Вып. 1(91). С. 67–76.
8. Гальянов А. В., Лаптев Ю. В., Корешков Д. В., Клочихина Т. И. Технико-экономическое обоснование грохотильной схемы рудоподготовки в карьере ОАО «Ураласбест»: отчет / ИГД УрО РАН; рук. Гальянов А. В., Лаптев Ю. В. Екатеринбург, 2003. 57 с.
9. Вайсберг Л. А., Рубисов Д. Г. Массово-балансовая модель вибрационного грохочения сыпучих материалов // Обогащение руд. 1988. № 5.С. 5–8.
10. Маслобоев В. Г. Математическая модель процесса грохочения // Изв. вузов. Горный журнал. 1987. № 7. С. 109–122.
11. Лаптев Ю. В. Геометризация процесса сегрегации скальных пород по крупности при формировании отвалов: дис. … д-ра техн. наук. Екатеринбург, 2007. 303 с.
12. Андреев С. Е., Перов В. А., Зверевич В. В. Дробление, измельчение и грохочение полезных ископаемых. М.: Недра, 1980. 415 с.
13. Барон Л. И. Характеристики трения горных пород. М.: Наука, 1967. 206 с.
14. Рубинштейн Ю. Б., Волков Л. А. Математические методы в обогащении полезных ископаемых. М.: Недра, 1987. 296 с.
15. Андреев Е. Е., Биленко Л. Ф., Петров В. А. Дробление, измельчение и грохочение полезных ископаемых. М.: Недра, 1990. 301 с.
16. Рузинов Л. П., Слободчикова Р. И. Планирование эксперимента в химии и химической технологии. М.: Химия, 1980. 280 с.
17. Ахназарова С. Л., Кафаров В. В. Оптимизация эксперимента в химии и химической технологии. М.: Высш. школа, 1978. 319 с.

Статья поступила в редакцию 29 мая 2020 года

УДК 622.271.325:622.74 https://doi.org/10.21440/2307-2091-2020-3-107-114

Optimization of parameters of open-pit screening and dumping stations

Valeriy Daniilovich KANTEMIROV*
Roman Sergeevich TITOV**

Institute of Mining of the Ural Branch of RAS, Ekaterinburg, Russia

Abstract

Introduction. 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 operations, the degree of crushing of a mineral depends on the content of useful components in it, and the chemical composition of the ore is differentiated by size classes. The determined relationship between the quality of the ore mass and its size can be used to increase the efficiency of the ore preparation technology through the use of screening and dumping stations (SDS) in open pits. The implementation of the ore preparation technology based on the SDS will allow to reduce the costs of enrichment and transportation of the ore mass by separating its substandard part directly in the open pit and excluding it from the traffic flow at the processing plant, where the efficient operation of SDS is possible by optimizing a number of parameters as mining transport equipment serving SDS and a screener itself.

Results. To determine the main parameters of SDS the characteristics of the initial movement of the rock mass along the inclined surface of the screen were determined, such as the productivity of unloading the vehicle onto the surface, the initial thickness of the layer for feeding and the speed of movement of the rock mass along the slope of the screener. Based on the presented algorithm, the main characteristics of the screening process are calculated: the size of the material flow layer in the *i*-th screener section; the speed of movement of the bulk mass along the screener; the average size of a piece in the starting material and the output of the material into screen throughs. The parameters of the screening process were determined on the basis of a given relative content of the size class of the material supplied to the surface of the screener, subject to its uniform distribution within the class. The optimized parameters of SDS were selected: the angle of inclination of the screener and the linear dimensions of the unloading platform, depending on the dimensions of the dump truck. Determination of the optimal parameters of SDS was carried out by constructing a generalized desirability function for two optimized criteria: the material yield to screen throughs and the oversize of the screener. Based on results of the calculation, optimization graphs of the dependence of the optimization function on the angle of inclination of the surface of the screener and the carrying capacity of the dump truck unloaded onto the screener were constructed.

Conclusions. The optimal angle of inclination of SDS screen is 40°–42° and does not depend on the grain size distribution of the feedstock supplied to screening.

Keywords: optimization, ore preparation, screening and dumping station, screening efficiency, screening parameters, material size, desirability function.

REFERENCES

1. Yakovlev V. L., Kantemirov V. D., Yakovlev A. M., Titov R. S. 2019, Main directions of improving the methods of ore preparation of mineral raw materials. *Problemy nedropol'zovaniya* [Subsurface use problems], no. 3, pp. 95–106. (*In Russ.*) https://doi.org/10.25635/2313-1586.2019.03.095
2. Kantemirov V. D. 2014, Technological features of the development of new resource bases. *Gornyy informatsionno-analiticheskiy byulleten'* [Mining informational and analytical bulletin], no. 6, pp. 369–373. (*In Russ.*)
3. Kantemirov V. D. 2015, Technological aspects of the development of several types of minerals in one quarry. *Marksheyderiya i nedropol'zovaniye* [Mine surveying and subsurface use], no. 5, pp. 22–30. (*In Russ.*)
4. Vasiliev M. V. 1968, *Vnutrikar'yernoye skladirovaniye i peregruzka rud* [In-pit storage and handling of ores]. Moscow, 184 p.
5. Galyanov A. V., Laptev Yu. V. 1999, *Rudopodgotovka na kar'yerakh* [Ore preparation in quarries]. Ekaterinburg, 426 p.
6. Galyanov A. V., Laptev Yu. V., Blinov A. N., Afonin Yu. A., Moseikin D. E. 2000, Improving the technology of sampling and preparation of samples of magnesite raw materials in ore streams of OAO Magnezit: report. Galyanov A. V., Laptev Yu. V. Ekaterinburg, 48 p.
7. Laptev Yu. V., Galyanov A. V., Koreshkov D. V. 2003, *Perspektivy grokhotil'nykh skhem rudopodgotovki na gornykh predpriyatiyakh* [Prospects for screening schemes for ore preparation at mining enterprises], collection of research papers of RAS, issue 1 (91)., pp. 67–76.
8. Galyanov A. V., Laptev Yu. V., Koreshkov D. V., Klochihina T. I. 2003, Feasibility study of a screening scheme for ore preparation in the open pit of OAO Uralasbest: report. Galyanov A. V., Laptev Yu. V. Ekaterinburg, 57 p.
9. Weisberg L. A., Rubisov D. G. 1988, Mass-balance model of vibrating screening of bulk materials. *Obogashchenie Rud* [Mineral processing Journal], no. 5, pp. 5–8. (*In Russ.*)

✉ukrkant@mail.ru
https://orcid.org/0000-0001-6486-2740
**ukrigd15@mail.ru
https://orcid.org/0000-0002-3569-2743

10. Masloboev V. G. 1987, Mathematical model of the screening process. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedenii. Gornyi zhurnal* [News of the Higher Institutions. Mining Journal], no. 7, pp. 109–122. (*In Russ.*)
11. Laptev Yu. V. 2007, *Geometrizatsiya protsessa segregatsii skal'nykh porod po krupnosti pri formirovanii otvalov* [Geometrization of the process of segregation of rocks by size during the formation of dumps], PhD thesis. Ekaterinburg, 303 p.
12. Andreev S. E., Perov V. A., Zverevich V. V. 1980, *Drobleniye, izmel'cheniye i grokhocheniye poleznykh iskopayemykh* [Crushing, grinding and screening of minerals]. Moscow, 415 p.
13. Baron L. I. 1967, *Kharakteristiki treniya gornykh porod* [Friction characteristics of rocks], 206 p.
14. Rubinstein Yu. B., Volkov L. A. 1987, *Matematicheskiye metody v obogashchenii poleznykh iskopayemykh* [Mathematical methods in mineral processing]. Moscow, 296 p.
15. Andreev E. E., Bilenko L. F., Petrov V. A. 1990, *Drobleniye, izmel'cheniye i grokhocheniye poleznykh iskopayemykh* [Crushing, grinding and screening of minerals]. Moscow, 301 p.
16. Ruzinov L. P., Slobodchikova R. I. 1980, *Planirovaniye eksperimenta v khimii i khimicheskoy tekhnologii* [Planning an experiment in chemistry and chemical technology]. Moscow, 280 p.
17. Akhnazarova S. L., Kafarov V. V. 1978, *Optimizatsiya eksperimenta v khimii i khimicheskoy tekhnologii* [Optimization of experiment in chemistry and chemical technology]. Moscow, 319 p.

The article was received on May 29, 2020