

МОДЕЛИРОВАНИЕ И ОПТИМИЗАЦИЯ ПРОЦЕССА РУДОПОДГОТОВКИ КОМПЛЕКСНЫХ РУД ПРИ ИХ ДЕЗИНТЕГРАЦИИ В МЕЛЬНИЦЕ САМОИЗМЕЛЬЧЕНИЯ

К.А. Мелехина¹, П.П. Ананьев¹, А.В. Плотникова¹, А.С. Тимофеев², С.А. Шестак³

¹ Ассоциация субъектов инновационной деятельности в горной отрасли,
Москва, Россия, e-mail: k.melekhina@mail.ru

² Институт проблем комплексного освоения недр РАН, Москва, Россия

³ АО «Кольская ГМК», Заполярный, Россия

Аннотация: Целью работы являлась оптимизация соотношения компонентов в многокомпонентной полиминеральной рудной шихте после крупного дробления по критерию повышения производительности мельницы самоизмельчения. Выявлено влияние гранулометрического состава и физико-механических свойств многокомпонентной полиминеральной шихты на производительность мельницы самоизмельчения (МСИ) с использованием законов дробления, вещественного состава компонентов шихты на их физико-механические свойства, а также разработаны основы алгоритма формирования рудной шихты. Сформулирована модель оптимизации соотношения компонентов полиминеральной рудной шихты, подаваемой в мельницу самоизмельчения. Модель оптимизации позволит повысить долю мелющих тел и уменьшить долю трудноизмельчаемого класса, что в дальнейшем может обеспечить прирост производительности мельницы самоизмельчения. Данная модель была заложена в основу алгоритма управления производительностью. Были созданы основы для алгоритма управления производительностью мельницы самоизмельчения по изменению долевого участия железной руды в шихте в виде математической модели. Ввиду того, что АСУ ТП рудоподготовки на рассматриваемом предприятии не имеет полного завершения в части недостаточного количества датчиков, обеспечивающих требуемый уровень информативности для решения задач оптимизации шихтования, математическая модель была упрощена. Данная математическая модель далее будет использована как основа для алгоритма управления производительностью мельницы самоизмельчения.

Ключевые слова: мельница самоизмельчения, многокомпонентная шихта, комплексные руды, оптимизация шихтования, производительность, плотность, крупность.

Для цитирования: Мелехина К. А., Ананьев П. П., Плотникова А. В., Тимофеев А. С., Шестак С. А. Моделирование и оптимизация процесса рудоподготовки комплексных руд при их дезинтеграции в мельнице самоизмельчения // Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2020. – № 10. – С. 95–105. DOI: 10.25018/0236-1493-2020-10-0-95-105.

Modeling and optimization of complex ore pretreatment by disintegration in autogenous mills

K.A. Melekhina¹, P.P. Ananyev¹, A.V. Plotnikova¹, A.S. Timofeev², S.A. Shestak³

¹ Association of Subjects of Innovative Activity in Mining Industry «Innovative Mining Technologies», Moscow, Russia, e-mail: k.melekhina@mail.ru

² Institute of Problems of Comprehensive Exploitation of Mineral Resources of Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia

³ Kola MMC JSC, Zapolyarny, Russia

Abstract: The study aims to optimize multi-component polymineral ore mixture ratio after coarse grinding by the criterion of autogenous mill productivity gain. The influence of grain-size composition, as well as physical and mechanical properties of multi-component polymineral ore mixture on autogenous mill productivity are determined using the crushing laws are determined, the effect of the material constitution of the mixture components on the physical and mechanical properties is revealed, and the elements of ore mixture algorithm are developed. The optimization model is elaborated for the polymineral ore mixture ratio in autogenous milling. The optimization model can increase the number of milling bodies and decrease the difficult size grade, which further on can ensure the autogenous mill productivity gain. The model was used as a framework of the productivity control algorithm. The outlines are proposed for the autogenous mill productivity control algorithm by means of iron ore ratio adjustment in the ore mixture as a mathematical model. Since automated control system of ore pretreatment circuit at the studied factory is incompletely equipped with required sensors to provide sufficient information for the mixture making optimization, the mathematical model was simplified. This model will be further used as a framework for the autogenous mill productivity control algorithm.

Key words: autogenous mill, multi-component ore mixture, complex ore, ore mixture making optimization, productivity, density, coarseness.

For citation: Melekhina K.A., Ananyev P.P., Plotnikova A.V., Timofeev A.S., Shestak S.A. Modeling and optimization of complex ore pretreatment by disintegration in autogenous mills. *MIAB. Mining Inf. Anal. Bull.* 2020;(10):95-105. [In Russ]. DOI: 10.25018/0236-1493-2020-10-0-95-105.

Введение

В настоящее время все больше обогатительных фабрик используют для измельчения руд мельницы самоизмельчения. Однако режим самоизмельчения не всегда может обеспечить требуемый уровень производительности. Это связано с трудностями разрушения рудных кусков среднего размера. Дробленая руда, поступая в мельницу самоизмельчения, подлежит дезинтеграции за счет ударов крупных рудных кусков, являющихся мелющими телами [3, 4]. При попадании крупного куска на мелкий кусок происходит дезинтеграция мелкого

куска. Если соотношение масс крупного и среднего куска (соотношение их размеров) недостаточно отличаются, то полная дезинтеграция не происходит. Поэтому ограничение производительности мельниц самоизмельчения связано с наличием трудноизмельчаемого класса [10–11]. Для рассматриваемого процесса можно условно обозначить следующие диапазоны размеров рудных кусков в мельнице самоизмельчения [1]:

- мелющие тела, более 150 мм;
- трудноизмельчаемый класс, от 70 до 150 мм;

- измельчаемый класс, от 20 до 70 мм;
- готовый класс, менее 20 мм.

Из вышеприведенного следует, что производительность мельницы самоизмельчения во многом определяется составом шихты: если в данный момент времени средняя интегральная крепость шихты меньше ее среднего значения по месторождению, то производительность мельницы самоизмельчения будет выше среднего планового значения. Если в следующий момент времени средняя интегральная крепость шихты больше ее среднего значения по месторождению, то производительность мельницы будет ниже планового значения [6, 8, 9].

Очевидно, что при снижении производительности мельницы необходимо увеличить долю мелющих тел, при повышении производительности — в случае необходимости уменьшить. Управление долей мелющих тел может осуществляться как за счет изменения доли крупного класса (более 150 мм), так и за счет изменения их плотности. Реализация первого способа управления затруднительна, так как потребует оперативного изменения процесса крупного дробления. Второй способ может быть реализован за счет изменения доли железосодержащих руд.

Дезинтеграцию руды наиболее полно описывают законы Риттингера и Розина-Раммлера.

Закон Розина-Раммлера определяет остаток на сите с ячейкой размером a :

$$R = 100e^{-\left(\frac{a}{a_0}\right)^m}, \quad (1)$$

где a_0 и m — эмпирические коэффициенты.

При дезинтеграции искусственного минерального сырья, имеющего высокую однородность, $m = 2$.

При дезинтеграции природного минерального сырья, состоящего из смеси различных руд, $m \neq 2$.

Для нахождения эмпирического коэффициента a_0 и m в случае использования общего уравнения Розина-Раммлера необходимо знать не менее двух значений остатков на сите размером ячейки a_1 и a_2 [5].

Если $a = a_1$, где a_1 — размер ячейки 1-го сита, то

$$R = R_1 = 100e^{-\left(\frac{a_1}{a_0}\right)^m}.$$

Если $a = a_2$, где a_2 — размер ячейки 2-го сита, то

$$R = R_2 = 100e^{-\left(\frac{a_2}{a_0}\right)^m}.$$

Таким образом, a_0 и m находятся по следующим формулам:

$$m = \ln \frac{\ln(R_1)}{\ln(R_2)} \frac{\ln \frac{a_1}{a_2}}{a_2} \quad (2)$$

$$a_0 = \frac{-a_1}{\frac{1}{m} \ln(R_1)} \quad (3)$$

Под многокомпонентной шихтой на рассматриваемом предприятии подразумевается смесь железосодержащего и медесодержащего компонентов, которые являются продуктами получения двух видов концентрата — медного и железного.

На основе полученных выражений были произведены расчеты распределения по фракциям двухкомпонентной шихты при следующих исходных данных:

Компонент 1 с повышенной крепостью относительно средней крепости шихты имел значение a_{01} , равное 90 мм;

Компонент 2 с пониженной крепостью относительно средней крепости шихты имел значение a_{02} , равное 60 мм;

Гранулометрический состав шихты рассчитывался при долевом участии компонента 1 — 0,25; 0,5 и 0,75.

Дополнительно по полученным результатам расчета гранулометрического

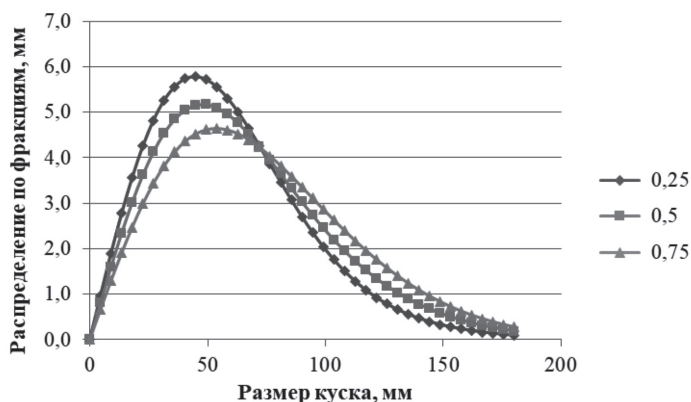


Рис. 1. Распределение по фракциям двухкомпонентной шихты при различном долевом участии компонентов

Fig. 1. Fraction distribution of two-component mixture at different mixture ratios

состава двухкомпонентной шихты был выявлен показатель m , входящий в уравнение Розина-Раммлера. Для его определения были выбраны два значения размера ячейки сита: $a_1 = 72$ мм и $a_2 = 31,5$ мм. Результаты расчета значений m приведены в табл. 1.

Расчет удельной поверхности двухкомпонентной шихты определялся как:

$$S_{\text{шихты}} = 6 \cdot \sqrt{\pi} \cdot \left[\frac{a_1}{a_{01}} + \frac{(1 - q_1)}{a_{02}} \right] \quad (4)$$

Уравнения Риттингера связывает энергозатраты на дезинтеграцию с величиной вновь образованной поверхности. Вследствие того, что для решения поставленной задачи по повышению

производительности мельницы самоизмельчения нас интересует не размер куска после дезинтеграции, а производительность дробильно-измельчительного комплекса, то рационально использовать уравнения Риттингера [11].

Анализ закономерностей распределения гранулометрического состава двухкомпонентной рудной шихты позволяет выявить зависимость между производительностью мельницы самоизмельчения (МСИ) и характеристиками шихты, подаваемой на ее питание. Производительность МСИ должна быть прямо пропорциональна отношению доли крупных кусков рудного материала, входящего в состав шихты, отнесенного к количест-

Таблица 1

Исходные данные и результаты расчета эмпирического коэффициента m , характеризующего рассеяние частиц по крупности при разном долевом участии компонентов

Input and calculation data on empirical coefficient m as a characteristic of coarseness distribution of particles at different component ratios

Размер ячейки сита, a , мм	Величина надрешетного продукта R , % при долях первого компонента q		
	q		
	0,25	0,50	0,75
72,0	28,40	35,30	42,10
31,5	76,00	79,10	82,20
m	1,84	1,80	1,79

Таблица 2

Исходные данные и результаты расчета удельной поверхности шихты
Input and calculation data on specific surface of ore mixture

Удельная поверхность шихты, м ² /м ³	Величина удельной поверхности двухкомпонентной шихты, м ² /м ³ при долях первого компонента q		
	q		
	0,25	0,5	0,75
S _{ШИХТЫ}	0,16	0,15	0,13

ву руды в МСИ, подлежащего измельчению [7]. Кроме того, производительность МСИ должна быть обратно пропорциональна удельной энергоемкости дезинтеграции, определяемой уравнением Риттингера [2, 5]:

$$\Pi \sim \frac{D_{\text{мельюц}}}{D_{\text{изм}}} \cdot \frac{1}{k \cdot \Delta S}, \quad (5)$$

где $D_{\text{мельюц}}$ – доля их тел; $D_{\text{изм}}$ – доля измельчаемого материала; $k \cdot \Delta S$ – удельная энергоемкость дезинтеграции по Риттингеру.

Доля мелющих тел для данного процесса определяется процентным соотношением в шихте крупных кусков более 150 мм для руды, не содержащей железа (медной руды), а также долей крупных кусков повышенной плотности относительно плотности медно-содержащей руды:

Доля мелющих тел:

$$\begin{aligned} D_{\text{мельюц}} &= qe^{-\left(\frac{a_{k1}}{a_{01}}\right)^2} + (1-q)e^{-\left(\frac{a_{kp.2}}{a_{02}}\right)^2} = \\ &= qe^{-\left(\frac{a_{kp.2}}{a_{01} \cdot \bar{\rho}^{\frac{1}{3}}}\right)^2} + (1-q)e^{-\left(\frac{a_{kp.2} \cdot a_{01}}{a_{02} \cdot a_{01}}\right)^2} = \\ &= qe^{-\left(\frac{a_{kp.2}}{a_{01} \cdot \bar{\rho}^{1/3}}\right)^2} + (1-q)e^{-\left(\frac{a_{kp.2} \cdot a_{01}}{a_{01} \cdot a_{02}}\right)^2} = \\ &= qe^{-\left(\frac{a_{kp.2}}{a_{01} \cdot \bar{\rho}^{1/3}}\right)^2} + (1-q)e^{-\left(\frac{a_{kp.2} \cdot b}{a_{01}}\right)^2} \end{aligned}$$

Доля измельчаемой руды определяется объемом измельчаемой руды, уменьшенной на долю готового класса (меньше 20 мм) и долю мелющих тел:

$$\begin{aligned} D_{\text{изм.мат}} &= 1 - D_{\text{ГТ}} - D_{\text{мельюц}} = \\ &= \left[qe^{-\left(\frac{a_{\text{ГТ}}}{a_{01}}\right)^2} + (1-q)e^{-\left(\frac{a_{\text{ГТ}} \cdot b}{a_{01}}\right)^2} \right] =, \quad (7) \\ &= \left[qe^{-\left(\frac{a_{kp.2}}{a_{01} \cdot \bar{\rho}^{1/3}}\right)^2} + (1-q)e^{-\left(\frac{a_{\text{ГТ}} \cdot b}{a_{01}}\right)^2} \right] \end{aligned}$$

Удельная энергоемкость, определяемая уравнением Риттингера, прямо пропорциональна крепости шихты, умноженной на площадь вновь образованной поверхности, где крепость шихты:

$$f_{\text{шихты}} = f_1 \left[q + \frac{1}{b}(1-q) \right], \quad (8)$$

$$\begin{aligned} \Delta S &= \frac{1}{a_{\text{тр.изм}}} - \frac{1}{a_{\text{ШИХТЫ}}} = \\ &= \frac{1}{a_{\text{тр.изм}}} - S_{\text{ШИХТЫ}} \end{aligned}, \quad (9)$$

Используя совокупность вышеприведенных уравнений, можно создать алгоритм оптимизации состава шихты по критерию повышения производительности мельницы самоизмельчения. При этом следует учитывать, что крепость и плотность железорудного компонента (на рассматриваемом предприятии преимущественно магнетитовые скарны) шихты определяется следующими закономерностями:

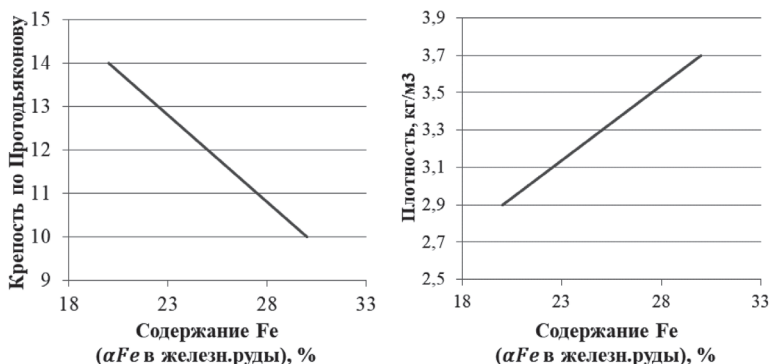


Рис. 2. Зависимость крепости по Протодяконову и плотности железной руды от содержания Fe в ней
 Fig. 2. Dependence of Protodyakonov's hardness factor and density of iron ore on its Fe content

- зависимостью крепости по Прото-
 дяконову железной руды от содержа-
 ния железа (рис. 2);
- зависимостью плотности желез-
 ной руды от содержания железа в ней
 (рис. 2).

$$F_{\text{железн.руды}} = -0,4 \cdot \alpha_{\text{Fe в железн.руды}} + 22 \quad (10)$$

$$\rho_{\text{железн.руды}} = 0,08 \cdot \alpha_{\text{Fe в железн.руды}} + 1,3 \quad (11)$$

Последовательный расчет значений параметров для математической модели оптимизации соотношения компонен- тов многокомпонентной шихты произ- водится по формулам, представленным в табл. 3.

Вначале вводятся в математическую модель необходимые исходные дан- ные, указанные в пунктах 1–8 табл. 3, а также доля железной руды, доля мед- ной вычисляется как $1 - q$.

Так как в условиях реального произ- водства значения поступающих исход- ных данных имеют погрешность, прак- тическое использование основ данного алгоритма требует дополнительных спо- собов их обработки. Решение данной проблемы является техническим секре- том и охраняется в режиме ноу-хау, по- этому полный алгоритм с учетом его адаптации к производству в данной ста- тье не приведен.

Для апробации основ алгоритма (ма- тематической модели) были введены различные значения исходных данных. Предлагаемую математическую модель можно применять для обогащительных фабрик при наличии всех исходных данных. Свойства каждого компонента шихты затруднительно измерять на по- токе, поэтому возникла необходимость создать упрощенную модель, основан- ную на зависимости производительности МСИ от параметров шихты, а имен- но: среднего размера куска в шихте, среднего содержания железа в шихте, долевого соотношения железорудного и медесодержащего компонента. На осно- вании значений, полученных в табл. 3, была выявлена корреляционна зависи- мость производительности МСИ от со- держания железа и долевого участия железорудного компонента для одного из горнорудных предприятий Восточной Сибири.

Корреляционная зависимость выгля- дит следующим образом:

$$Q = -0,190 + 1,024 \cdot a_0 + 1,254 \cdot a_{\text{Fe в шихте}} - 1,034 \cdot q_{\text{железн.шихты}} + 0,247 \cdot q^2_{\text{железн.шихты}} - 0,293 \cdot a^2_{\text{Fe в шихте}} \quad (12)$$

Данная корреляционная зависимость легла в основу упрощенной математи-

Таблица 3

Расчет значений для математической модели оптимизации соотношения компонентов многокомпонентной шихты

Calculations for mathematical model of multi-component ore mixture ratio optimization

Ввод исходных данных:		
1	α_{01}	Размер отверстия сита, при котором остаток на сите составляет 37%
2	f_1	Коэффициент крепости железной руды по Протодьяконову
3	f_2	Коэффициент крепости медной руды по Протодьяконову
4	$\alpha_{кр2}$	Критический класс крупности, меньше которого кусок не является мелющим телом
5	ρ_{Cu}	Плотность медной руды, кг/м ³
6	ρ_{Fe}	Плотность железной руды, кг/м ³
7	$\alpha_{гт}$	Размер отверстия сита для готового класса, мм
8	$\alpha_{тр.изм}$	Размер отверстия сита для трудноизмельчаемого класса, мм
Расчет:		
1	$b = f_1 / f_2$	Отношение коэффициентов крепости 1 и 2 компонентов
2	$\bar{\rho} = \rho_{Fe} / \rho_{Cu}$	Отношение плотности 1 и 2 компонентов
3	$f_{шихты} = f_1 \left[q + \frac{1}{b}(1 - q) \right]$	Коэффициент крепости шихты по Протодьяконову
4	$S_{шихты} = \frac{1}{a_{шихты}} = \frac{1}{a_{01}} [q + b(1 - q)]$	Площадь удельной поверхности шихты
5	$\Delta S = \frac{1}{a_{тр.изм}} - \frac{1}{a_{шихты}} = \frac{1}{a_{тр.изм}} - S_{шихты}$	Изменение площади удельной поверхности
6	$A = a_{кр2} / a_{01}$	Коэффициент для расчета пунктов 7 и 8
7	$A_1 = A / \bar{\rho}^{1/3}$	Коэффициент для расчета пункта 9
8	$A_2 = A \cdot b$	Коэффициент для расчета пункта 9
9	$D_{мелющ} = q \cdot e^{-A_1^2} + (1 - q)e^{-A_2^2}$	Доля мелющих тел
10	$A_3 = a_{гт} / a_{01}$	Коэффициент для расчета пункта 12
11	$A_4 = A_3 \cdot b$	Коэффициент для расчета пункта 12

12	$D_{изм.мат} = qe^{-A_5^2} + (1-q)e^{-A_4^2}$	Доля измельчаемого материала
13	$\Pi = \frac{D_{мельниц}}{D_{изм} \cdot f \cdot \Delta S}$	Производительность мельницы самоизмельчения

ческой модели оптимизации соотношения компонентов в многокомпонентной полиминеральной рудной шихте после крупного дробления по критерию повышения производительности мельницы самоизмельчения без наличия исходных данных по плотности и крепости медного компонента. Графическое представление модели изображено на рис. 3.

Зная производительность в предыдущий момент времени, долевое участие железорудного компонента и содержание железа в нем, можно управлять производительностью в последующий момент времени за счет изменения долевого участия железорудного компонента и изменения содержания Fe в железорудном компоненте. Данная модель была получена при условии поддержания среднего размера куска. Производительность и долевое участие железорудного ком-

понента представлены на рис. 3 в относительных величинах. Относительное содержание Fe находится как отношение текущего содержания железа к среднему запланированному на месяц содержанию Fe в железорудном компоненте. Относительная производительность МСИ находится как отношение текущей производительности к средней запланированной на месяц производительности МСИ. Долевое участие, равное 1, отражает среднее запланированное значение железорудного компонента в шихте на конкретный период времени, значение 0,75 означает, что долевое участие железорудного компонента необходимо снизить на 25% относительно среднего запланированного на месяц, а значение 1,25 означает, что долевое участие необходимо увеличить на 25% относительно среднего запланированного на месяц. Также математическую модель можно

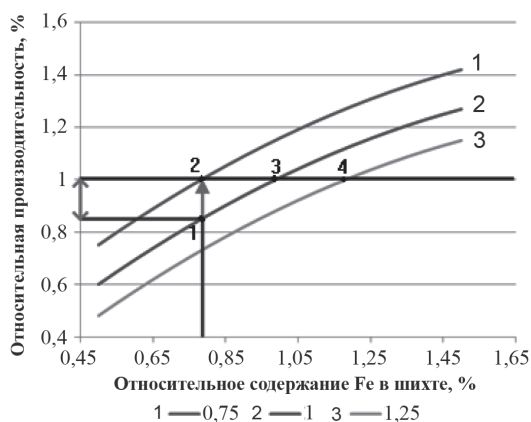


Рис. 3. Графическое представление модели оптимизации соотношения компонентов в многокомпонентной рудной шихте по критерию повышения производительности мельницы самоизмельчения
 Fig. 3. Flow-chart of optimization model for multi-component ore mixture ratio by the autogenous mill productivity gain criterion

усовершенствовать, введя в нее оперативные данные об изменении среднего размера куска в шихте.

Для понимания работы математической модели оптимизации соотношения компонентов в многокомпонентной полиминеральной рудной шихте после крупного дробления по критерию повышения производительности мельницы самоизмельчения рассмотрим пример. На рис. 3 обозначена точка 1, производительность в данной точке 0,8. Повысить производительность в следующий момент времени можно тремя способами. Первый способ (точка 2) — снизить долю железорудного компонента на 25% относительно среднего запланированного значения при сохранении содержания Fe на том же уровне. Второй способ (точка 3) — повысить содержание Fe относительно среднего запланированного на месяц при сохранении того же долевого участия железорудного компонента в шихте. Третий способ (точка 4) — повысить доленое участие железорудного компонента на 25% и содержание Fe в железорудном компоненте относительного среднего запланированного значения.

Для удобства на рассматриваемом предприятии был организован склад, где руды штабелируются в зависимости от типа руды и содержания в них полезного компонента. Резервы данного склада позволяют применять математическую модель.

На предприятии была проведена апробация упрощенной математической модели. Средние значения производительности мельницы самоизмельчения без оптимизации состава шихты и с оптимизацией составом шихты составили 94% и 96,3% соответственно. Далее был определен относительный прирост производительности:

$$\Delta П = \frac{96,6 - 94,0}{94,0} \cdot 100\% .$$

В результате апробации модели установлено, что оптимизация долевого участия железосодержащих и медесодержащих компонентов может обеспечить прирост производительности на 2,4%.

Заключение

В работе были рассмотрены способы определения гранулометрического состава многокомпонентной шихты, параметров уравнения Розина-Раммлера, зависящие от соотношения компонентов шихты и их физико-механических свойств. Данные уравнения легли в основу алгоритма управления производительностью мельницы самоизмельчения по изменению соотношения компонентов в шихте. Была установлена возможность формирования оптимального соотношения компонентов рудной шихты для комплексных руд, имеющих широкий диапазон коэффициента крепости и плотности. Оптимальное соотношение компонентов шихты, подаваемой в мельницу самоизмельчения, позволяет повысить долю мелющих тел и уменьшить долю трудноизмельчаемого класса. Это обеспечивает прирост производительности мельницы самоизмельчения.

На основе зависимости производительности от среднего размера куска в шихте, среднего содержания железа в шихте, долевого соотношения железорудного и медесодержащего компонента создана упрощенная математическая модель оптимизации соотношения компонентов в многокомпонентной полиминеральной рудной шихте после крупного дробления по критерию повышения производительности мельницы самоизмельчения. Средний размер куска в шихте в математической модели был принят как постоянная величина. Данную математическую модель можно применять и при изменении среднего размера куска.

Представленная математическая модель была апробирована в Ассоциации субъектов инновационной деятельности в горной отрасли «Инновационные горные технологии» в рамках ряда про-

ектов, выполняемых на базе различных производств. Корректность модели была оценена посредством ретроспективного анализа с использованием служебных баз данных.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Gupta A., Yan D. Autogenous and semi-autogenous mills / *Mineral Processing Design and Operations*. Ch. 9. 2-nd edition, 2016. Pp. 263–285.
2. Morrell S. Modelling the influence on power draw of the slurry phase in Autogenous (AG), Semi-autogenous (SAG) and ball mills // *Minerals Engineering*. 2016. Vol. 89. Pp. 148–156.
3. Yu. P., Xie. W., Liu L. X., Powell M. S. Analytical solution for the dynamic model of trumbling mills // *Powder Technology*. 2018. Vol. 337. Pp. 111–118.
4. Steyn C. W., Sandrock C. Benefits of optimisation and model predictive control on a fully autogenous mill with variable speed // *Minerals Engineering*. 2013. Vol. 53. Pp. 113–123.
5. Гзогян Т. Н., Гзогян С. Р. Дробление, измельчение и подготовка сырья к обогащению: учебное пособие. – Белгород, 2017. – 217 с.
6. Тараненко М. Е. Автоматизированная система управления технологическим процессом измельчения руды в мельницах мокрого самоизмельчения // *Горный информационно-аналитический бюллетень*. – 2010. – № 10. – С. 369–372.
7. Таранов В. А. Оценка прочностных свойств руды как фактор повышения эффективности процесса измельчения // *Горный информационно-аналитический бюллетень*. – 2015. – № 4. – С. 119–123.
8. Хомунов Э. А. Моделирование процессов дезинтеграции руд // *Известия вузов. Горный журнал*. – 2016. – № 3. – С. 104–114.
9. Хопунов Э. А. Анализ причин низкой энергоэффективности процессов разрушения минерального сырья // *Современная техника и технологии*. – 2014. – № 10.
10. Шишкин А. А., Ястребов К. Л. Исследование параметров работы мельниц рудного самоизмельчения // *Вестник ИрГТУ*. – 2012. – № 11 (70). – С. 100–110.
11. Шишкин А. А., Ястребов К. Л. Исследование особенностей технологии дезинтеграции дробленых горных пород // *Вестник ИрГТУ*. – 2012. – № 11 (70). – С. 176–180.
12. Шишкин А. А. Исследование влияния силы трения на движение элементов загрузки мельниц рудного самоизмельчения // *Вестник ИрГТУ*. – 2012. – № 9 (68). – С. 211–213. **МИАБ**

REFERENCES

1. Gupta A., Yan D. Autogenous and semi-autogenous mills. *Mineral Processing Design and Operations*. Ch. 9. 2-nd edition, 2016. Pp. 263–285.
2. Morrell S. Modelling the influence on power draw of the slurry phase in Autogenous (AG), Semi-autogenous (SAG) and ball mills. *Minerals Engineering*. 2016. Vol. 89. Pp. 148–156.
3. Yu. P., Xie. W., Liu L. X., Powell M. S. Analytical solution for the dynamic model of trumbling mills. *Powder Technology*. 2018. Vol. 337. Pp. 111–118.
4. Steyn C. W., Sandrock C. Benefits of optimisation and model predictive control on a fully autogenous mill with variable speed. *Minerals Engineering*. 2013. Vol. 53. Pp. 113–123.
5. Gzogyan T. N., Gzogyan S. R. *Droblenie, izmel'chenie i podgotovka syr'ya k obogashcheniyu: uchebnoe posobie* [Crushing, milling and preparation of rough stock for processing: Teaching aid: Educational aid], Belgorod, 2017, 217 p.
6. Taranenko M. E. Automated control of ore milling circuit in autogenous wet mills. *MIAB. Mining Inf. Anal. Bull.* 2010, no 10, pp. 369–372. [In Russ].

7. Taranov V.A. Ore strength assessment as a factor of milling efficiency enhancement. *MIAB. Mining Inf. Anal. Bull.* 2015, no 4, pp. 119–123. [In Russ].
8. Khomunov E.A. Modeling ore disintegration processes. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy. Gornyy zhurnal.* 2016, no 3, pp. 104–114. [In Russ].
9. Khopunov E.A. Causes of low energy efficiency of mineral disintegration processes. *Sovremennaya tekhnika i tekhnologii.* 2014, no 10. [In Russ].
10. Shishkin A.A., Yastrebov K.L. Analysis of autogenous mill performance parameters. *Vestnik Irkutskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta.* 2012, no 11 (70), pp. 100–110. [In Russ].
11. Shishkin A.A., Yastrebov K.L. Features of disintegration technology for crushed rocks. *Vestnik Irkutskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta.* 2012, no 11 (70), pp. 176–180. [In Russ].
12. Shishkin A.A. Influence of friction force on kinematics of autogenous mill feed elements. *Vestnik Irkutskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta.* 2012, no 9 (68), pp. 211–213. [In Russ].

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Мелехина Кристина Андреевна¹ — лаборант-исследователь,
e-mail: k.melekhina@mail.ru,

Ананьев Павел Петрович¹ — канд. техн. наук,
генеральный директор, e-mail: cigt@mail.ru,

Плотникова Анна Валериевна¹ — заместитель
генерального директора, e-mail: cigt@mail.ru,

Тимофеев Александр Сергеевич — канд. техн. наук,
старший научный сотрудник, ИПКОН РАН,
e-mail: timofeev_ac@mail.ru,

Шестак Сергей Анатольевич — главный специалист
технического отдела технического управления
АО «Кольская ГМК», e-mail: schestaksa@kolagmk.ru,

¹ Ассоциация субъектов инновационной деятельности в горной отрасли.

Для контактов: Мелехина К.А., e-mail: k.melekhina@mail.ru.

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

K.A. Melekhina¹, Research Assistant, e-mail: k.melekhina@mail.ru,

P.P. Ananyev¹, Cand. Sci. (Eng.),

General Director, e-mail: cigt@mail.ru,

A.V. Plotnikova¹, Deputy General Director, e-mail: cigt@mail.ru,

A.S. Timofeev, Cand. Sci. (Eng.), Senior Researcher,

Institute of Problems of Comprehensive Exploitation

of Mineral Resources of Russian Academy of Sciences,

111020, Moscow, Russia, e-mail: timofeev_ac@mail.ru,

S.A. Shestak, Chief Specialist of Technical Department

of Technical Management, Kola MMC JSC,

Zapolyarny, Russia, e-mail: schestaksa@kolagmk.ru,

¹ Association of Subjects of Innovative Activity in Mining Industry

«Innovative Mining Technologies», Moscow, Russia.

Corresponding author: K.A. Melekhina, e-mail: k.melekhina@mail.ru.

Получена редакцией 10.03.2020; получена после рецензии 21.06.2020; принята к печати 20.09.2020.

Received by the editors 10.03.2020; received after the review 21.06.2020; accepted for printing 20.09.2020.