

Обобщение опыта обследований и оптимизации рудоподготовительных переделов обогатительных фабрик с использованием методов моделирования в программном пакете JK SimMet

Братыгин Е. В.^{1*}, Ельникова С. П.¹, Демин А. И.¹

¹ АО «Уралмеханобр», г. Екатеринбург, Россия

*e-mail: bev@umbr.ru

Реферат

Введение. Компьютерный пакет для имитационного моделирования JK SimMet позволяет решить задачи по оптимизации переделов рудоподготовки с учетом свойств руды и параметров оборудования, а также разработать технологическую схему для строительства новой фабрики.

Целью работы являлось определение параметров уравнения распределения частиц для медных и медно-цинковых руд на основе обобщения опыта оптимизации обогатительных фабрик ОАО «Уральская горно-металлургическая компания» (УГМК).

Методика проведения исследований заключалась в обработке результатов опробования рудоподготовительных переделов обогатительных фабрик УГМК, включающих традиционное трехстадийное дробление и последующее измельчение, а также технологию полусамозмельчения. Для каждого из продуктов методом Левенберга–Марквардта выполнен расчет параметров уравнений и определена зависимость параметра уравнения Розина–Раммлера от крупности слива гидроциклонов и классификаторов для медных и медно-цинковых руд. Анализ зависимости показал необходимость использования распределения частиц по крупности с целью прогнозирования энергетических показателей и адаптации моделей оборудования для условий действующей фабрики. Модели оборудования, используемые в программном пакете JK SimMet, учитывают распределение частиц по крупности в каждом продукте – в отличие от методики Ф. Бонда.

Вывод. С 2018 г. на основании результатов проведенных опробований и адаптации моделей оборудования в пакете JK SimMet предложены рекомендации по улучшению технологических показателей более чем для десяти предприятий УГМК. Основные рекомендации связаны с изменением таких параметров оборудования, как подбор насадок гидроциклонов, размер ячейки грохота, величина разгрузочной щели дробилки, процент заполнения мельниц измельчающей средой, а также ее размер и др. Реализация рекомендаций на ПАО «Гайский ГОК» позволила увеличить производительность рудоподготовительного комплекса на 8–10 %, а также содержание класса в сливе гидроциклонов, поступающего в операцию флотации, с 67,2 до 79,1 %.

Ключевые слова: программный пакет JK SimMet; оптимизация технологии; уравнение Розина–Раммлера; рудоподготовка; измельчение; полусамозмельчение.

Введение. При проектировании обогатительных фабрик используются обще-принятые методики, предусматривающие определенные допущения при расчете оборудования. Для оптимизации технологии на существующих обогатительных фабриках в настоящее время используются компьютерные пакеты, такие как JK SimMet и SimFloat, которые позволяют спрогнозировать технологические показатели при изменении свойств исходной руды и параметров оборудования. Программный пакет JK SimMet дает возможность для имитационного моделирования

рудоподготовительного оборудования: дробилки, грохоты стержневые и шаровые мельницы, мельницы само- и полусамозмельчения, гидроциклоны и др. Использование программного пакета JK SimMet позволяет решить задачи как оптимизации существующей технологии рудоподготовки на обогатительных фабриках, так и разработки новой технологии рудоподготовки на базе данных работы предприятий-аналогов.

Целью работы являлось определение параметров уравнения распределения частиц на основе обобщения опыта оптимизации обогатительных фабрик ОАО «Уральская горно-металлургическая компания» (УГМК).

Современные методы проектирования рудоподготовительных переделов обогатительных фабрик чаще всего включают в себя расчет измельчительно-го оборудования по методике Ф. Бонда, опубликованной в 1951–1952 гг. [1, 2]. В ее основе лежит эмпирическая формула, устанавливающая взаимосвязь между параметром крупности и энергией, затрачиваемой на разрушение [3], где крупность продуктов характеризуется размером ячейки, через которую проходит 80 % всех частиц. Эта методика позволяет произвести расчеты и выбрать типоразмер оборудования при проектировании обогатительных фабрик, однако она имеет недостаточную точность для задач, связанных с оптимизацией действующих производств [4, 5]. О. Н. Тихонов в своих работах [6, 7] показал, что для повышения точности в этой методике необходимо учитывать распределение частиц по крупности в питании и продукте стадии. Согласно [8], энергия, затрачиваемая на измельчение, рассчитывается по формуле:

$$E_{\gamma} = \int_0^{l_{2\max}} \gamma_{\text{др.}}(l_2) \left[\int_0^{l_{1\max}} \gamma_{\text{исх.}}(l_1) E(l_1, l_2) dl_1 \right] dl_2, \quad (1)$$

где E_{γ} – потребляемая энергия, кВт · ч/т; $l_{1\max}$ и $l_{2\max}$ – максимальные размеры частиц питания и продукта дробления, мкм; $\gamma_{\text{исх.}}(l_1)$ и $\gamma_{\text{др.}}(l_2)$ – плотности распределения по крупности для питания и продукта дробления, мкм⁻¹; $l_1 = \text{var}$ и $l_2 = \text{var}$ – переменные размеры частиц питания и продукта дробления, мкм ($0 < l_1 < l_{1\max}$; $0 < l_2 < l_{2\max}$); $E(l_1, l_2)$ – двумерное энерго-крупностное соотношение как функция начального и конечного размера частиц.

Анализ формулы показывает, что для ее использования необходимо задаться непрерывно дифференцируемой функцией, описывающей распределение частиц по крупности в питании и продукте. Для описания гранулометрической характеристики продуктов разрушения в практике обогащения наибольшее распространение получили уравнение Розина–Раммлера [9, 10], «логистическая» и log-normal функции [11, 12]. С целью оценки их адекватности для описания гранулометрического состава выполнена обработка результатов опробования песков и сливов классификаторов и гидроциклонов, а также непосредственно разгрузки мельниц. Эти распределения получены в результате опробований обогатительных фабрик медных и медно-цинковых руд в течение пяти лет на предприятиях, входящих в группу компаний УГМК. Для каждого из продуктов методом Левенберга–Марквардта [13–15] выполнен подбор коэффициентов для каждой из перечисленных функций. Критерием выбора уравнения являлась минимизация суммы квадратов ошибок. Расчеты показали, что из 116 продуктов, прошедших обработку, в 73 случаях предпочтение отдается уравнению Розина–Раммлера, в 29 – «логистической» и в 14 – log-normal функциям. При этом функция Розина–Раммлера применима во всех случаях.

Уравнение Розина–Раммлера имеет следующий вид [10]:

$$R = 100e^{-bd^n},$$

где R – суммарный выход класса x по плюсу, %; d – крупность, мм; b и n – параметры, зависящие от свойств материала и размерности величины d .

Функция Розина–Раммлера в литературе приводится также и в относительном размере частиц, который принимается равным отношению диаметра частицы к размеру ячейки, через которую проходит 63,2 % всех частиц [16]. Тогда функция имеет только один параметр. Суммарный выход классов крупности определяется по формуле:

$$\gamma_{\text{сум}} = e^{-(d/d_{63,2})^n},$$

где $\gamma_{\text{сум}}$ – суммарный выход, %; d – размер ячейки сита, мм; $d_{63,2}$ – размер ячейки, через которую проходит 63,2 % частиц, мм.

Функция Розина–Раммлера является интегральной, и для использования в уравнении (1) она должна быть продифференцирована, также необходимо перейти от относительного к физическому размеру частиц. В этом случае функция становится двухпараметрической, а ее использование существенно упрощается. С учетом сказанного уравнение для оценки затрат энергии принимает вид:

$$E = \int_0^{l_{2\max}} \left[-\exp(-b_2 l_2^{n_2}) b_2 n_2 l_2^{n_2-1} \times \right. \\ \left. \times \int_0^{l_{1\max}} -\exp(-b_1 l_1^{n_1}) b_1 n_1 l_1^{n_1-1} 10W \left(\frac{1}{\sqrt{l_2}} - \frac{1}{\sqrt{l_1}} \right) dl_1 \right] dl_2,$$

где b_1 , n_1 , b_2 , n_2 – параметры уравнения Розина–Раммлера; W – индекс Ф. Бонда, кВт · ч/т.

В результате обработки данных проведенных опробований фабрик УГМК была построена зависимость параметра функции Розина–Раммлера n от крупности P_{80} , размера ячеек сита, через которую проходит 80 % частиц измельченного материала, для слива гидроциклонов и классификаторов (рис. 1). Величина параметра n применяется не только для общей оценки гранулометрической характеристики продукта, но и для расчета содержания требуемого класса крупности по заданному содержанию одного из крупных классов, позволяя решить задачу по определению содержания требуемого класса в сливе при известной крупности разделения. В литературных источниках указано [16], что параметр n в уравнении Розина–Раммлера для характеристики крупности слива классификаторов мельниц в первой стадии измельчения близок к единице, диапазон значений параметра n , приведенный в [9], составляет от 0,5 до 1,1. Однако, согласно полученным нами результатам расчетов для медных и медно-цинковых руд, параметр n находится в более широких пределах и зависит от крупности продуктов. Анализ зависимости показывает, что параметр n стабилен в диапазоне $P_{80} > 0,14$ мм. С повышением тонины помола увеличивается и значение параметра n . Следовательно, данный факт повышает значимость использования распределения по крупности при расчете потребляемой энергии, так как одному значению крупности может соответствовать множество распределений.

Также использование полного распределения частиц по крупности позволяет более детально подходить к операциям внутри цикла измельчения и корректно проводить оптимизацию.

При проектном расчете аналогичная ситуация складывается и для классифицирующего оборудования. Например, усредненные по большому количеству данных эмпирические зависимости, приведенные в [17], позволяют выполнить подбор гидроциклонов с определенной погрешностью, допустимой для проекторочного расчета. Кроме того, во многих случаях, когда схема включает межстадиальные

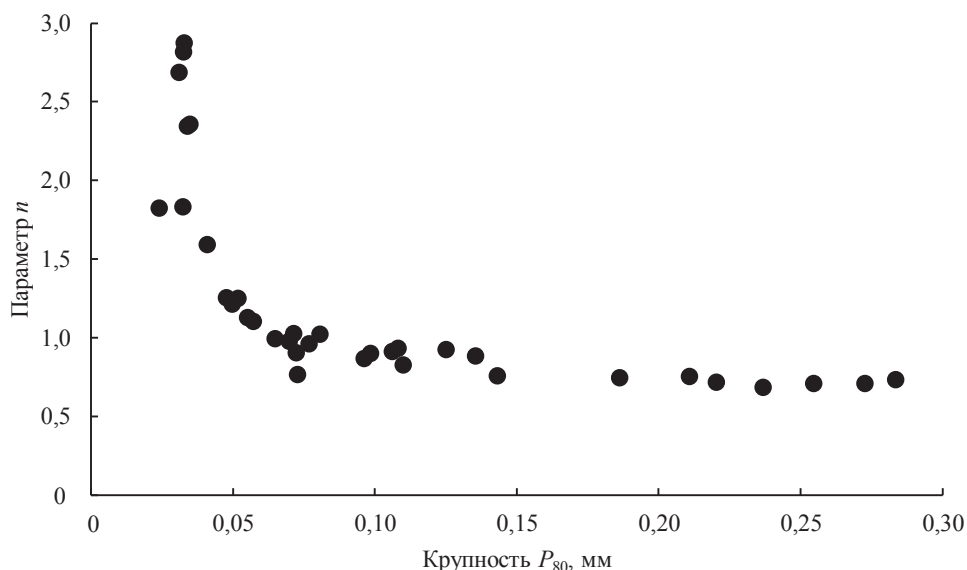


Рисунок 1. Зависимость параметра n от крупности P_{80} слива гидроциклонов и классификаторов для медных и медно-цинковых руд

Figure 1. Dependence between the n parameter and the P_{80} size of the hydrocyclones discharge and classifiers for copper and copper-zinc ores

обогащительные операции, и процесс ведется с постадиальным выводом продукта, для операций доизмельчения физико-механические свойства продукта в питании операции могут отличаться от свойств, определенных на пробе исходной руды [18]. Таким образом, выбор и расчет измельчительного и классифицирующего оборудования для проектирования фабрик производится по известным методикам [10, 19], однако с учетом взаимозависимости гранулометрических характеристик, параметров оборудования, и в условиях колебания свойств руды оптимизация реальных циклов требует проведения детального опробования действующего производства и адаптации моделей под условия фабрики.

Специализированный программный пакет для компьютерного моделирования JK SimMet – современный способ оптимизации технологических схем процессов рудоподготовки в условиях действующего производства [20–22]. В качестве исходных используются данные, полученные в ходе опробования технологии, и фактические замеры параметров оборудования. Анализ полученных результатов позволяет адаптировать встроенные математические модели для наиболее точного учета особенностей оборудования, установленного на фабрике.

Наиболее широко применяемой для оптимизации работы мельниц в условиях действующего производства является модель шаровой мельницы с использованием принципов идеального перемешивания. Модель, представленная

У. Дж. Уайтен [23, 24], включена в состав программного обеспечения JKMRС и является основным методом моделирования шаровых мельниц, представляет собой комбинацию матричной и кинетической моделей с одной стороны и модели массового баланса с другой [25, 26], включает в себя распределение частиц питания и продукта по крупности, функции скорости разрушения и скорости разгрузки, а также функцию разгрузки и имеет следующий вид:

$$f_i - p_i + \sum_{j=1}^i a_{ij} \left(\frac{r_j}{d_j} \right) p_j - \left(\frac{r_i}{d_i} \right) p_i = 0,$$

где f_i – производительность питания по классу i , т/ч; p_i – производительность продукта по классу i , т/ч; a_{ij} – массовая доля частиц данного размера, которые после измельчения достигают размера i ; r_i и r_j – скорости разрушения частиц размера i и j , соответственно, ч⁻¹; d_i и d_j – скорости разгрузки частиц размера i и j , соответственно, ч⁻¹.

Зная параметры питания и продукта мельницы и используя приведенное уравнение, можно рассчитать параметр r_i / d_i , описывающий работу мельницы. Полученный параметр в дальнейшем может быть применен для моделирования мельницы в условиях изменяющегося гранулометрического состава и производительности питания мельницы. Таким образом, использование модели в программном пакете JK SimMet позволяет учесть все распределение частиц по крупности, в отличие от методики Ф. Бонда, что приводит к уменьшению погрешности при оптимизации технологии.

К задачам, которые решает моделирование в программном пакете JK SimMet, относятся повышение производительности фабрики, увеличение содержания готового класса в стадиях измельчения, а также комбинация этих задач. Кроме того, с его помощью можно дать точный прогноз технологических показателей при изменении типоразмеров или перекомпоновки оборудования в существующей технологии рудоподготовки, не прибегая к промышленным экспериментам. Преимуществом использования программного пакета JK SimMet является высокая точность расчетов, возможность в короткие сроки провести несколько серий имитационного моделирования и за счет этого выбрать наиболее эффективную технологию рудоподготовки, обеспечивающую решение поставленных задач.

Результаты использования программного пакета JK SimMet. В период с 2018 г. по настоящее время АО «Уралмеханобр» использует программный продукт JK SimMet при выполнении научно-исследовательских работ для оптимизации технологии рудоподготовки на предприятиях: АО «Святогор», АО «Бурибаевский ГОК», АО «СУМЗ», филиал «Производство полиметаллов» АО «Уралэлектромедь», ТОО «Nova Цинк», АО «Учалинский ГОК», ЗАО «Урупский ГОК», ОА «Покровский рудник», ПАО «Гайский ГОК» и др. Основными изменяемыми параметрами оборудования при оптимизации технологии рудоподготовки являются:

- процент заполнения мельницы измельчающей средой и ее размер (диаметр шара);
- количество и типоразмер оборудования, находящегося в работе;
- размеры насадок на гидроциклонах и др.

Кроме того, уменьшение крупности продукта, поступающего на измельчение, и объемное содержание твердого в питании гидроциклона также оказывают значительное влияние на эффективность работы оборудования.

В рамках технологического аудита обогатительной фабрики ОАО «Святогор» рекомендовано несколько вариантов оптимизации технологического режима с целью

повышения эффективности работы переделов измельчения и классификации для руд Волковского и Ново-Шемурского месторождений. В результате производительность обогатительной фабрики выросла на 15–20 % при увеличении извлечения меди и цинка на 1,0–1,5 %.

При моделировании технологии рудоподготовки обогатительной фабрики АО «Бурибаевский ГОК» для руды Октябрьского месторождения были разработаны рекомендации, благодаря которым повышены производительность фабрики на 10 %, а также содержание готового класса в продуктах, поступающих в операции флотации, что позволит увеличить извлечение меди и цинка в концентраты.

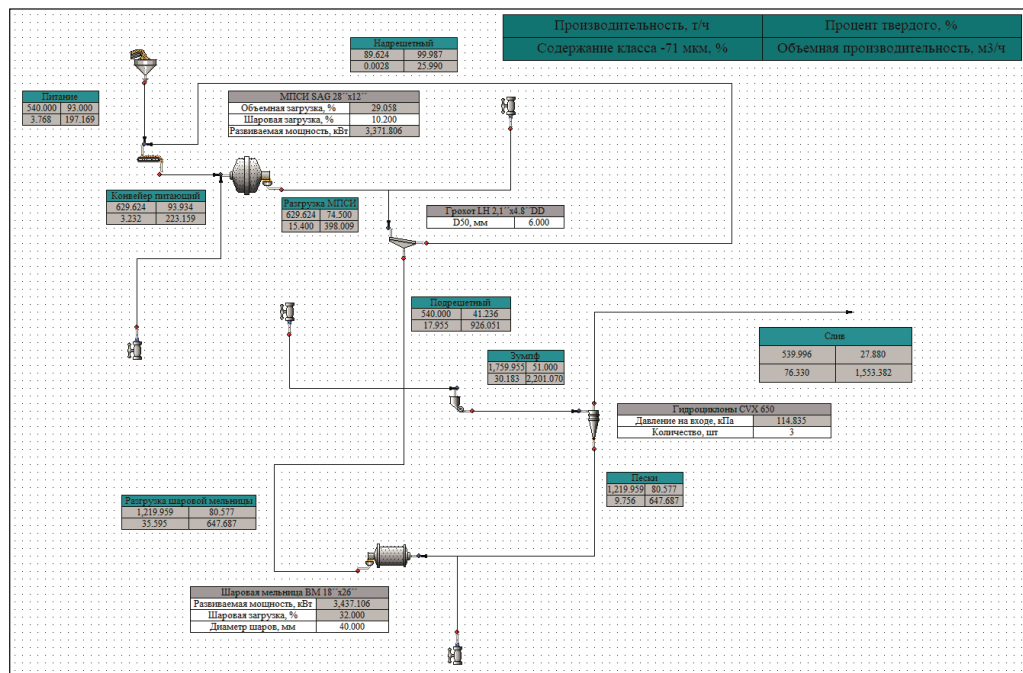


Рисунок 2. Результат моделирования схемы рудоподготовки обогатительной фабрики ПАО «Гайский ГОК» в программном пакете JK SimMet
 Figure 2. Result of modeling the ore preparation scheme of the Gaisky MMP beneficiation plant in the JK SimMet software package

При анализе результатов опробования технологии переработки шлаков на АО «СУМЗ» даны рекомендации, реализация которых позволила изменить технологическую схему рудоподготовительного передела, а также увеличить производительность фабрики на 100 тыс. т в год.

Для филиала «Производство полиметаллов» АО «Уралэлектромедь» в рамках аудита обогатительной фабрики по результатам моделирования рассчитаны различные варианты, предусматривающие изменения технологии и оборудования в отделении дробления. Кроме того, выданы рекомендации по оптимизации работы передела рудоподготовки без его реконструкции с возможностью повышения годовой производительности фабрики при существующем наборе сырья с 488 до 590 тыс. т руды в год.

Разработка новой технологии рудоподготовки для обогатительной фабрики АО «Святогор» по переработке руд Волковского месторождения выполнена в программном пакете JK SimMet. Компьютерное моделирование позволило в короткие сроки и с высокой точностью рассмотреть несколько десятков вариантов рудопод-

готовительных переделов, включающих использование валков высокого давления, дробилок, мельниц полусамозмельчения, шаровых и стержневых мельниц, гидроциклонов и другого оборудования. В результате выбрана технологически оптимальная и экономически целесообразная схема переработки руды Волковско-го месторождения, обеспечивающая достижение требуемых показателей.

Для оптимизации технологии рудоподготовительного передела линии «Б» на ПАО «Гайский ГОК» были поставлены следующие задачи:

- увеличение производительности по исходной руде до 540 т/ч;
- увеличение содержания класса $-0,071$ мм в сливе гидроциклонов, поступающем на флотацию.

Согласно результатам опробования, производительность линии составила 490 т/ч, содержание класса $-0,071$ м в сливе гидроциклонов – 67,2 %. На основании результатов проведенного опробования проведена адаптация математических моделей для последующих имитационных симуляций. Для достижения задач разработано несколько вариантов моделирования схемы, которые предусматривали включение в работу дробилки HP500 для дробления критического класса крупности мельницы полусамозмельчения (МПСИ), а также вариант без работы дробилки для дробления. Рекомендации для достижения требуемых показателей включали в себя изменения шаровой нагрузки мельницы МПСИ, размера ячейки грохота, диаметров насадок гидроциклонов, а также снижение объемного содержания в питании гидроциклонов. Результат моделирования технологической схемы представлен на рис. 2.

В результате моделирования показана возможность увеличения производительности технологической линии с 490 до 540 т/ч (на 10,2 %), а также увеличение массовой доли класса $-0,071$ мм в сливе гидроциклонов с 67,2 до 76,3 %. После внедрения рекомендаций на линии «Б» проведены промышленные испытания, по результатам которых производительность составила 528 т/ч, а содержание класса $-0,071$ мм в сливе гидроциклонов увеличилось с 67,2 до 79,1 %. Таким образом, результаты промышленных испытаний позволяют говорить об адекватности используемых моделей для выполнения оптимизационных задач.

Выводы. Реализация рекомендаций, разработанных с применением JK SimMet, позволяет оптимизировать передел рудоподготовки на любой обогатительной фабрике с минимальными затратами за счет более эффективного использования установленного на фабрике оборудования, а также разработать новую технологию рудоподготовки для проектируемого предприятия на базе верифицированных моделей оборудования фабриканалогов.

Модели, используемые в программном пакете JK SimMet, учитывают полное распределение частиц по крупности, что, в отличие от предложенной Ф. Бондом методики расчета, позволяет с высокой точностью прогнозировать эффекты от изменений параметров оборудования (насадок гидроциклонов, диаметра шаров и т. п.) и технологического режима (плотности пульпы за счет подачи дополнительной воды и др.).

Рекомендации АО «Уралмеханобр» по оптимизации рудоподготовительных переделов для предприятий УГМК позволили увеличить производительность по исходному сырью, достичь требуемого содержания класса $-0,071$ мм и извлечения полезных компонентов в операциях флотации.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Bond F. C. The third theory of comminution // Transactions on AIME Mining Engineering. 1952. Vol. 193. P. 484494.
2. Рундквист А. К. Общая форма законов дробления // Научно-технический бюллетень Механообра. 1956. № 2. С. 11–15.

3. Андреев С. Е. Законы дробления // Горный журнал. 1952. № 7. С. 36–38.
4. Андреев Е. Е., Тихонов О. Н. Дробление, измельчение и подготовка сырья к обогащению. СПб.: СПГИ (ТУ), 2007. 439 с.
5. Ельникова С. П., Газалева Г. И. Прогнозирование энергии разрушения в конусных дробилках, работающих «в слое» // Обогащение руд. 2019. № 5. С. 3–8.
6. Тихонов О. Н. Методика измерения индексов работы для законов Риттингера, Кика–Кирпичева и Бонда // Обогащение руд. 2008. № 5. С. 10–14.
7. Тихонов О. Н. Расчет энергии дробления и измельчения с учетом характеристик крупности // Обогащение руд. 2008. № 3. С. 10–14.
8. Тихонов О. Н. Энергетически усредненная крупность смеси частиц и ее использование в формулах Бонда, Риттингера и Кика–Кирпичева // Обогащение руд. 2008. № 4. С. 13–18.
9. Ревнивцев В. И., Гапонов Г. В., Зарогатский Л. П. Селективное разрушение минералов. М.: Недра, 1988. 286 с.
10. Андреев С. Е. Дробление, измельчение и грохочение полезных ископаемых. М.: Недра, 1966. 395 с.
11. King R. P. Modeling and simulation of mineral processing systems. Boston: Butterworth-Heinemann, 2006. 403 p.
12. Колмогоров А. Н. О логарифмически-нормальном законе распределения размеров частиц при дроблении // ДАН СССР. 1941. Т. 31. № 2. С. 99–101.
13. More J. J. The Levenberg-Marquardt algorithm: implementation and theory // Conference on Numerical Analysis University of Dundee, Scotland, June 28–July 1. 1977. P. 105–116.
14. Henri P. Gavin. The Levenberg-Marquardt method for nonlinear least squares curve-fitting problems. Department of Civil and Environmental Engineering Duke University, 2024. URL: <https://people.duke.edu/~hpgavin/lm.pdf> (дата обращения: 20.06.2024)
15. Kong Q., Siau T., Bayen A. Python programming and numerical methods. A guide for engineers and scientists. London: Elsevier, 2020. 480 p.
16. Олевский В. А. Размольное оборудование обогатительных фабрик. М.: Госгортехиздат, 1963. 447 с.
17. Основы обогащения полезных ископаемых: справочник по оборудованию. Изд. 2. Metso minerals. 314 с. URL: www.metso.com (дата обращения: 20.06.2024)
18. Хопунов Э. А. Энергетические и силовые факторы селективного разрушения руд // Известия вузов. Горный журнал. 2020. № 1. С. 79–88.
19. Разумов К. А. Проектирование обогатительных фабрик. М.: Недра, 1970. 592 с.
20. Александрова Т. Н., Николаева Н. В., Львов В. В., Ромашев А. О. Повышение эффективности переработки руд благородных металлов на основе моделирования технологических процессов // Обогащение руд. 2019. № 2. С. 8–13.
21. Читалов Л. С., Львов В. В. Современные тенденции подходов к расчету рудоподготовительных процессов и аппаратов для переработки руд цветных металлов // Цветные металлы. 2020. № 10. С. 20–26.
22. Шипицына А. В., Герасименко С. И. Актуальность компьютерного моделирования в современной практике расчетов измельчительных циклов // Горная промышленность. 2021. № 5-2. С. 24–28.
23. Whiten W. J. A matrix theory of comminution machines // Chemical Engineering Science. 1974. No. 29. P. 585–599.
24. Napier-Munn T. J., Morrell S., Morrisson R. D., Kojovic T. Mineral comminution circuits. Their operation and optimization // JKMR. 1996. 413 p.
25. Whiten W. J., Kavetsky A. Studies on scale-up of ball mills // Minerals and Metallurgical Processing. 1984. P. 23–28.
26. Kavetsky A. A., Whiten W. J. Scale-up relations for industrial ball mills // Processing Australia's Institute Minerals Metallurgical. 1982. Vol. 282. P. 47–55.

Поступила в редакцию 24 июня 2024 года

Сведения об авторах:

Братыгин Евгений Владимирович – кандидат технических наук, заведующий отделом рудоподготовки и специальных методов исследований АО «Уралмеханобр». E-mail: bev@umbr.ru; <https://orcid.org/0000-0003-4049-3797>

Ельникова Светлана Павловна – кандидат технических наук, заведующий сектором рудоподготовки лаборатории окускования и физико-механических испытаний АО «Уралмеханобр». E-mail: elnikova_sp@umbr.ru; <https://orcid.org/0009-0008-1017-1504>

Демин Анатолий Игоревич – ведущий специалист лаборатории окускования и физико-механических испытаний АО «Уралмеханобр». E-mail: demin_ai@umbr.ru; <https://orcid.org/0009-0006-7406-5730>

Generalizing the experience of surveying and optimizing ore preparation stages at processing plants using modeling methods in the JK SimMet software package

Evgenii V. Bratygin¹, Svetlana P. Elnikova¹, Anatolii I. Demin¹

¹ AO Uralkhrom, Ekaterinburg, Russia.

Abstract

Introduction. The JK SimMet software package for simulation modeling allows to solve problems of optimizing ore preparation processes, taking into account the ore properties and equipment parameters, as well as develop a process flow diagram for the construction of a new factory.

Research objective was to determine the parameters of the particle distribution equation for copper and copper-zinc ores based on a generalizing the optimization experience of the Ural Mining and Metallurgical Company (UMMC) processing plants.

Methods of research consisted of processing the results of testing the ore preparation stages of the UMMC processing plants that include traditional three-stage crushing and subsequent grinding, as well as semi-autogenous grinding technology. For each of the products, the parameters of the equations were calculated using the Levenberg-Marquardt method and the dependence was determined between the Rosin-Rammler equation parameter and the size of the discharge of hydrocyclones and classifiers for copper and copper-zinc ores. Dependency analysis showed the need to use particle size distribution to predict energy performance and adapt equipment models to the conditions of an operating plant. The equipment models used in the JK SimMet software package take into account the particle size distribution in each product, in contrast to the F. Bond method.

Conclusion. Since 2018, based on the results of testing and adaptation of equipment models in the JK SimMet package, recommendations have been proposed to improve technological indicators for more than ten UMMC enterprises. The main recommendations are related to changes in equipment parameters, such as the selection of hydrocyclone nozzles, the size of the screen cell, the size of the crusher discharge slot, the percentage of mills load fraction, as well as its size, etc. The implementation of the recommendations at Gaisky mining and processing plant made it possible to increase the productivity of the ore preparation complex by 8–10%, and also increase the class content in the hydrocyclone discharge entering the flotation operation from 67.2 to 79.1%.

Keywords: JK SimMet software package; technology optimization; Rosin-Rammler equation; ore preparation; grinding; semi-autogenous grinding.

REFERENCES

1. Bond F. C. The third theory of comminution. *Transactions on AIME Mining Engineering*. 1952; 193: 484494.
2. Rundkvist A. K. The general form of crushing laws. *Nauchno-tehnicheskii biulleten Mekhanobra = The Scientific and Technical Bulletin of Mechanobr*. 1956; 2: 11–15. (In Russ.)
3. Andreev S. E. Crushing laws. *Gornyi zhurnal = Mining Journal*. 1952; 7: 36–38. (In Russ.)
4. Andreev E. E., Tikhonov O. N. *Raw material crushing, grinding and preparing for beneficiation*. St. Petersburg: SPMU Publishing; 2007. (In Russ.)
5. Elnikova S. P., Gazaleeva G. I. Reduction energy prediction for layer-type cone crushers. *Obogashchenie rud = Mineral Processing*. 2019; 5: 3–8. (In Russ.)
6. Tikhonov O. N. Methodology for measuring work indices for the laws of Rittinger, Kick-Kirpichev and Bond. *Obogashchenie rud = Mineral Processing*. 2008; 5: 10–14. (In Russ.)
7. Tikhonov O. N. Calculation of crushing and grinding energy taking into account the size characteristics. *Obogashchenie rud = Mineral Processing*. 2008; 3: 10–14. (In Russ.)
8. Tikhonov O. N. Energy-averaged particle size distribution and its use in Bond, Rittinger and Kick-Kirpichev formulas. *Obogashchenie rud = Mineral Processing*. 2008; 4: 13–18. (In Russ.)
9. Revnivitsev V. I., Gaponov G. V., Zarogatskii L. P. *Selective breaking of minerals*. Moscow: Nedra Publishing; 1988. (In Russ.)
10. Andreev S. E. *Raw minerals crushing, grinding and screening*. Moscow: Nedra Publishing; 1966. (In Russ.)
11. King R. P. *Modeling and simulation of mineral processing systems*. Boston: Butterworth-Heinemann, 2006. 403 p.

12. Kolmogorov A. N. On the logarithmically normal law of particle size distribution during crushing. *Doklady Akademii Nauk SSSR = Proceedings of the USSR Academy of Sciences*. 1941; 31(2): 99–101. (In Russ.)
13. More J. J. The Levenberg-Marquardt algorithm: implementation and theory. *Conference on Numerical Analysis University of Dundee, Scotland, June 28–July 1*. 1977. pp. 105–116.
14. Henri P. Gavin. *The Levenberg-Marquardt method for nonlinear least squares curve-fitting problems*. Department of Civil and Environmental Engineering Duke University, 2024. Available from: <https://people.duke.edu/~hpgavin/lm.pdf> [Accessed 20 June 2024]
15. Kong Q., Siau T., Bayen A. *Python programming and numerical methods. A guide for engineers and scientists*. London: Elsevier, 2020.
16. Olevskii V. A. *Size reduction equipment of the processing plants*. Moscow: Gosgortekhzdat, 1963. (In Russ.)
17. Metso minerals. *Fundamentals of Mineral Processing: Equipment Reference Book. Ed. 2*. Available from: www.metso.com [Accessed 20 June 2024]
18. Khopunov E. A. Energy and power factors of selective destruction of ores. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedenii. Gornyi zhurnal = News of the Higher Institutions. Mining Journal*. 2020; 1: 79–88. (In Russ.)
19. Razumov K. A. *Designing processing plants*. Moscow: Nedra Publishing; 1970. (In Russ.)
20. Aleksandrova T. N., Nikolaeva N. V., Lvov V. V., Romashev A. O. Ore processing efficiency improvements for precious metals based on process simulations. *Obogashchenie rud = Mineral Processing*. 2019; 2: 8–13. (In Russ.)
21. Chitalov L. S., Lvov V. V. Modern trends in the design of comminution processes and equipment for non-ferrous metals ores. *Tsvetnye metally = Non-Ferrous Metals Journal*. 2020; 10: 20–26. (In Russ.)
22. Shipitsyna A. V., Gerasimenko S. I. Relevance of computer modelling in current practice of grinding cycle calculations. *Gornaia promyshlennost = Russian Mining Industry*. 2021; 5-2: 24–28. (In Russ.)
23. Whiten W. J. A matrix theory of comminution machines. *Chemical Engineering Science*. 1974; 29: 585–599.
24. Napier-Munn T. J., Morrell S., Morrisson R. D., Kojovic T. Mineral comminution circuits. Their operation and optimization. *JKMRC*. 1996.
25. Whiten W. J., Kavetsky A. Studies on scale-up of ball mills. *Minerals and Metallurgical Processing*. 1984; 23–28.
26. Kavetsky A. A., Whiten W. J. *Scale-up relations for industrial ball mills. Processing Australia's Institute Minerals Metallurgical*. 1982; 282: 47–55.

Received 24 June 2024

Information about the authors:

Evgenii V. Bratygin – PhD (Engineering), Head of the Department of Ore Dressing and Special Methods of Investigation, OA Uralsmekhanobr. E-mail: bev@umbr.ru; <https://orcid.org/0000-0003-4049-3797>

Svetlana P. Elnikova – PhD (Engineering), Head of the Ore Preparation Sector, Laboratory of Agglomeration and Physical and Mechanical Testing, OA Uralsmekhanobr. E-mail: elnikova_sp@umbr.ru; <https://orcid.org/0009-0008-1017-1504>

Anatolii I. Demin – leading researcher, Laboratory of Agglomeration and Physical and Mechanical Testing, OA Uralsmekhanobr. E-mail: demin_ai@umbr.ru; <https://orcid.org/0009-0006-7406-5730>

Для цитирования: Братыгин Е. В., Ельникова С. П., Демин А. И. Обобщение опыта обследований и оптимизации рудоподготовительных переделов обогатительных фабрик с использованием методов моделирования в программном пакете JK SimMet // Известия вузов. Горный журнал. 2024. № 5. С. 17–26. DOI: 10.21440/0536-1028-2024-5-17-26

For citation: Bratygin E. V., Elnikova S. P., Demin A. I. Generalizing the experience of surveying and optimizing ore preparation stages at processing plants using modeling methods in the JK SimMet software package. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedenii. Gornyi zhurnal = Minerals and Mining Engineering*. 2024; 5: 17–26 (In Russ.). DOI: 10.21440/0536-1028-2024-5-17-26