

**Разработка модели МПСИ, основанной на результатах теста SAGDesign:
Применение при проектировании и оптимизации обогатительных фабрик**

S. Brochot¹ и M. Gonzalez Fernandez²

¹ Caspeo, ул. Авеню Клода Гиймен, 3, а/я 36009, 45060, Орлеан Седекс 2, Франция

² Caspeo Chile SpA, Сантьяго, Чили

АННОТАЦИЯ

Тест SAGDesign™, представленный на коммерческой основе в 2004 году, сегодня доказал свою эффективность при расчете размеров мельниц полусамозмельчения (МПСИ) для широкого спектра руд, от очень мягких до очень крепких. Интерес в создании модели МПСИ, использующей удельную энергию, полученную в рамках теста SAGDesign™, заключается в применении такой модели в рамках комплексного симулятора процессов обогащения с целью прогнозирования полного материального баланса схемы. Разработанная модель сравнивает необходимую удельную энергию с энергией мельницы. Соответствующий расчет выведен из формулы для мощности Austin (Austin Power Formula). Для учета действующих операционных условий, размеров питания и продукта, удельная энергия, полученная из результатов теста, корректируется с использованием различных параметров, таких, как индекс работы шаровой мельницы. Ядро этой модели позволяет определить размер d80 продукта используя геометрию мельницы, ее операционные условия и, конечно, результаты теста SAGDesign™. Для включения в комплексный расчет, модель должна также прогнозировать полное гранулометрическое распределение разгрузки мельницы МПСИ. В настоящей статье приведены предположения, отвечающие на этот вопрос. Модель была реализована в программном пакете для расчета технологических схем USIM PAC. Модель применима для прогнозирования гранулометрического распределения продукта действующей МПСИ, а также для расчета размеров МПСИ, при которых будет достигнута необходимая степень измельчения.

Ключевые слова

SAGDesign тест, технологическая схема обогащения полезных ископаемых, моделирование, расчет, расчет размеров оборудования

ВВЕДЕНИЕ

В течение нескольких последних лет рынку были представлены несколько новых типов измельчительного оборудования. Важнейшей новинкой стала валковая дробилка высокого давления – HPGR (Morley, 2006). При этом, хотя у указанного оборудования, несомненно, есть ряд преимуществ, оно пока не заслужило доверия в горнорудной отрасли. Поэтому в первую очередь до сих пор выбирают проверенные технологии. В измельчении это МПСИ и шаровые мельницы (ШМ).

Методика расчета ШМ широко распространена и в достаточной мере понятна уже в течение длительного времени. Индекс работы шаровой мельницы Бонда представляет собой стандартный тест, который помогает описать руду в части энергии, необходимой для измельчения. К сожалению, разработка эквивалентного теста для характеристики руды при измельчении в МПСИ потребовала времени. На сегодняшний день на рынке представлены несколько тестов, таких, как тест MacPherson, MinnovEX SAG Power Index (SPI™), JK Drop Weight Test, SMC Test® и тест SAGDesign™ (Verret et al., 2011).

Тест SAGDesign™, разработанный John Starkey в Канаде в ранних 2000х (Starkey et al., 2008, 2015), стал одним из стандартов для оценки измельчаемости руд в МПСИ. Одним из его преимуществ является то, что для проведения теста достаточно пробы сниженной массы, что в свою очередь снижает затраты на процедуру. Другим – то, что результат теста прост и ясен, это энергия, необходимая для измельчения руды в промежутке между двумя размерами. Вследствие такого энергетического подхода, результаты теста могут быть напрямую применены для расчета размеров проектируемых мельниц или оценки производительности действующих мельниц.

Модель МПСИ

Разработанная модель относится к классу энергетических моделей измельчения. Основными входными параметрами модели являются значения удельной энергии, определяемые в рамках проведения теста SAGDesign™ и теста в шаровой мельнице Бонда. Тест SAGDesign™ предоставляет значение энергии, необходимой для сокращения метрической тонны руды с d80F питания в 152.4мм до d80P продукта в 1.7мм (Starkey et al. 2008). Значение, определяемое в рамках теста, может быть скорректировано для представления необходимой энергии, когда размеры питания и/или продукта отличаются (уравнения 2 и 4 соответственно). Оно также может быть скорректировано для учета присутствия галечной дробилки (уравнение 3). С учетом всех поправочных коэффициентов, удельная энергия рассчитывается с помощью следующего уравнения 1:

$$E = E_{SAG} + F_1 + F_2 + F_3 \quad (1)$$



где:

E расчетная удельная энергия, кВт.ч/т

E_{SAG} удельная энергия теста SAGDesign, кВт.ч/т

F_1 поправочный коэффициент на размер питания, кВт.ч/т

$$F_1 = -\frac{5}{100} E_{SAG} \frac{152400 - d_{80F}}{25400} \quad (2)$$

d_{80F} d_{80} питания, мкм

F_2 поправочный коэффициент на наличие галечной дробилки, кВт.ч/т

$$F_2 = -(E_{SAG} + F_1) \frac{PCC}{100} \quad (3)$$

PCC доля эффекта поправочного коэффициента на наличие галечной дробилки, %

F_3 поправочный коэффициент на размер продукта, кВт.ч/т. Применяется, если d_{80P} продукта МПСИ меньше 1.7мм.

$$F_3 = 10W_i \left(\frac{1}{\sqrt{d_{80P}}} - \frac{1}{\sqrt{1700}} \right) \quad (4)$$

W_i индекс работы Бонда, кВт.ч/т

d_{80P} d_{80} продукта, мкм

Расчетная удельная энергия затем сравнивается с энергией, доступной для измельчения, которая представляет собой функцию производительности, размерных и операционных параметров мельницы. Расчет мощности мельницы, выведенный из формулы для мощности Austin (Austin, 1990), выполняется в соответствии с уравнением 5:

$$P_W = 10.6D^{2.5}L(1 - 1.03T_l) \left((1 - \varepsilon) \frac{\rho_s}{c_s} T_l - 0.6T_b \left(\rho_b - \frac{\rho_s}{c_s} \right) \right) V_r \left(1 - \frac{0.1}{2^{9-10V_r}} \right) \quad (5)$$

где:

P_W расчетная мощность, кВт

D диаметр мельницы, м

L длина мельницы, м

T_b доля объема, наполненного шарами, %

T_l доля объема, наполненного загрузкой, %

ε	пористость загрузки, %
ρ_s	средний удельный вес руды, т/м ³
c_s	%-твердого
ρ_b	удельный вес шаров, т/м ³
V_r	доля скорости вращения мельницы от критической скорости вращения

С помощью предыдущей формулы возможно рассчитать d_{80P} разгрузки мельницы для заданной производительности. Хотя это очень важная переменная, ее недостаточно для комплексной модели схемы (симулятора), которая должна учесть и следующие этапы процесса. Для этого потребуется рассчитать кривую гранулометрического распределения разгрузки мельницы полностью. Для этого в свою очередь необходимо сделать предположение о форме такой кривой. Данная модель предполагает, что гранулометрическое распределение разгрузки мельницы следует прямой линии Rosin-Rammler:

$$R(d) = 100 - 100e^{-\left(\frac{d}{d_{63.2}}\right)^m} \quad (6)$$

где:

$R(d)$	массовая доля частиц мельче d
m	наклон прямой линии Rosin-Rammler
$d_{63.2}$	размер частиц, для которого верно, что 63.2% всех частиц мельче указанного размера

Поскольку значение d_{80P} уже известно, значение наклона необходимо посчитать. Для этого предполагается, что наклон гранулометрического распределения разгрузки совпадает с наклоном гранулометрического распределения скорректированного питания. Гранулометрическое распределение скорректированного питания учитывает только частицы, размер которых меньше размера отверстий разгрузочной решетки мельницы. Более крупные частицы рассматриваются как мелющая среда. При использовании модели для оптимизации, наклон может быть скорректирован.

Пример 1: Расчет размеров оборудования в цикле измельчения с МПСИ, ШМ и галечной дробилкой (цикл SABCS)

Разработанная модель в первую очередь позволяет рассчитать размеры МПСИ. Метод расчета размеров соответствует таковому для стержневых и шаровых мельниц: зная измельчаемость руд через удельную энергию, полученную в рамках теста SAGDesign™, и



производительность, модель может рассчитать размер мельницы, необходимый для достижения заданной цели по измельчению.

Этот пример показывает расчет цикла SABC для медной руды с производительностью в 550 т/ч. Размер d_{80F} питания оценивается в 158мм, d_{80P} продукта должен быть около 200 мкм. Схема этого цикла показана на рисунке 1. Удельные энергии, приведенные в таблице 1, соответствуют 80му перцентилю совокупного распределения и являются основными входными данными для расчета размеров.

Таблица 1 – Основные параметры проекта

Параметр	Значение
Удельная энергия SAGDesign (кВт.ч/т)	8.76
Индекс работы шаровой мельницы Бонда (кВт.ч/т)	13.53

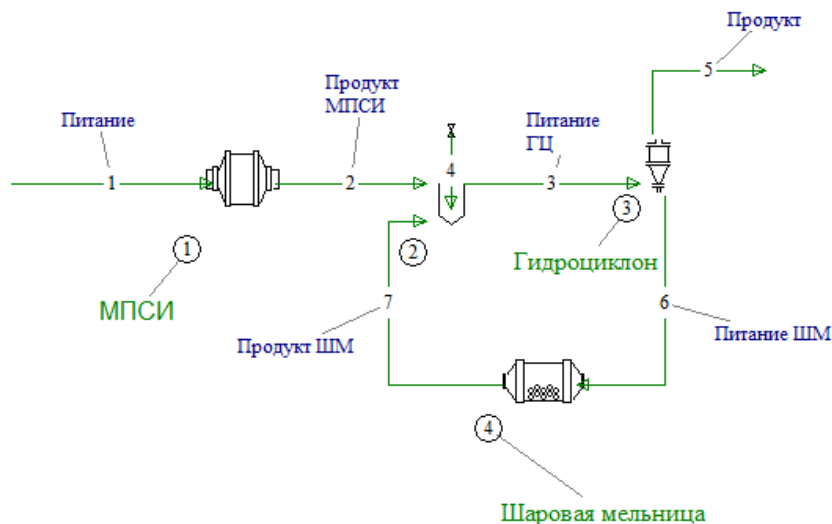


Рисунок 1 – Схема цикла измельчения типа SABC

Для расчета правильных размеров обеих мельниц необходимы дополнительные предположения, такие, как уровень загрузки мельницы, ее скорость и соотношение сторон. Основные предположения приведены в таблице 2:

Таблица 2 – Параметры, использованные для расчета размеров мельниц

Параметр	Значение
Соотношение сторон МПСИ (Длина/Диаметр)	0.5
Загрузка МПСИ шарами (%)	12
Общая загрузка МПСИ (%)	30
Скорость МПСИ (% от критической скорости)	0.62

Соотношение сторон ШМ (Длина/Диаметр)	1.35
Загрузка ШМ шарами (%)	35
Скорость ШМ (% от критической скорости)	0.71

Модель МПСИ в режиме расчета размеров позволяет инженеру ввести желаемое значение d_{80P} , что упрощает анализ различных конфигураций с целью нахождения наиболее удобного распределения мощности между МПСИ и шаровой мельницей. Таблицы 3 и 4 обобщают основные результаты расчета, таблица 5 показывает капитальные затраты CAPEX (Mular, 1982) на мельницы. Были протестированы три различных сценария. Каждый касался различных размеров мельниц, а потому – различного распределения мощности и CAPEX. Во всех сценариях основной задачей было получение продукта с значением d_{80} в 200 мкм.

Таблица 3 – Результаты расчета размеров МПСИ

Сценарий	Размер МПСИ (м)	Мощность МПСИ (кВт)	d_{80P} МПСИ (мкм)
1	9.11	5247	1203
2	8.98	5020	1512
3	9.23	5513	958

Таблица 4 – Результаты расчета размеров ШМ

Сценарий	Размер ШМ (м)	Мощность ШМ (кВт)	d_{80P} ШМ (мкм)
1	5.15	2811	367
2	5.35	3188	360
3	4.98	2517	361

В рамках всех сценариев считается, что в операционных параметрах мельниц нет изменений. Единственное изменение – размер мельниц. Это значит, что при укрупнении продукта мельницы повышается циркуляционная нагрузка.

Таблица 5 – CAPEX на МПСИ и ШМ

Сценарий	Стоимость МПСИ (US\$)	Стоимость ШМ (US\$)	ИТОГО (US\$)
1	6,147,404	4,277,609	10,425,013
2	5,945,790	4,633,466	10,579,256
3	6,381,318	3,987,369	10,368,687



Пример 2: Прогнозирование производительности мельницы

Разработанная модель МПСИ представляет собой не только инструмент для расчета размеров, она также может быть использована для построения симулятора [комплексной математической модели] существующего производства (Brochot et al., 2006). Перед таким симулятором может быть поставлен ряд задач, например, оптимизация цикла измельчения или прогнозирование производительности цикла на заданный год с использованием геометаллургических данных.

Рисунок 2 показывает упрощенную схему цикла измельчения одной из ЗИФ в Чили. Цикл включает 28-футовую МПСИ, две 16-футовых ШМ и две батареи гидроциклонов, в которых работают по четыре узла из пяти установленных.

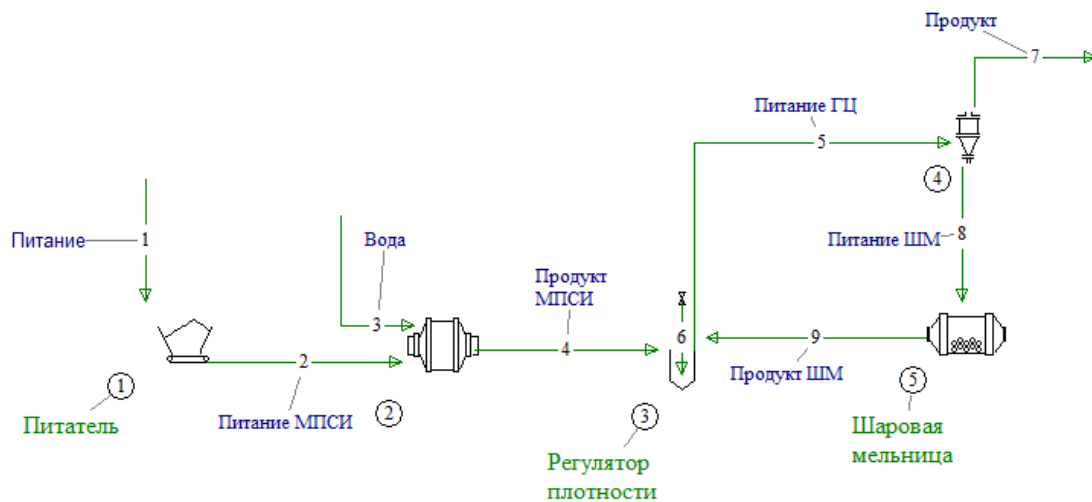


Рисунок 2 – Цикл измельчения золотой руды

Для оценки производительности цикла измельчения было проведено обследование. Собранные данные, включающие расходы и гранулометрические распределения, были статистически сбалансированы для получения согласованного набора данных. Согласованный баланс стал основой для построения симулятора цикла измельчения. Некоторые результаты исследования представлены в таблице 6.

Таблица 6 – Данные обследования фабрики

Параметр	Значение
Производительность (т/ч)	873
Мощность МПСИ (кВт)	2815
d_{80P} МПСИ (мкм)	1990
Мощность ШМ (кВт)	2342
d_{80P} ШМ (мкм)	489



Циркуляционная нагрузка (%)	175
d_{80P} цикла (мкм)	182

Модели МПСИ и ШМ откалиброваны с использованием встроенного в программный пакет USIM PAC алгоритма корректировки параметров модели (Model Parameter Adjustment - MPA). Для калибровки модели МПСИ, алгоритм MPA ищет значение удельной энергии SAGDesign™, при котором воспроизводится наилучшее соответствие гранулометрическому распределению разгрузки мельницы и ее мощности. Для калибровки модели ШМ, алгоритм MPA ищет значения параметров матрицы дробления и функции отбора, при которых также воспроизводится наилучшее соответствие гранулометрическому распределению разгрузки мельницы и ее мощности. Для калибровки модели гидроциклона алгоритмом MPA используются значения параметров разделения потока и скорректированной точки отсечения d_{50C} . Целью является обеспечение наилучшего воспроизведения гранулометрического распределения слива и песков. Рисунки 3 и 4 показывают результаты калибровки МПСИ и ШМ соответственно.

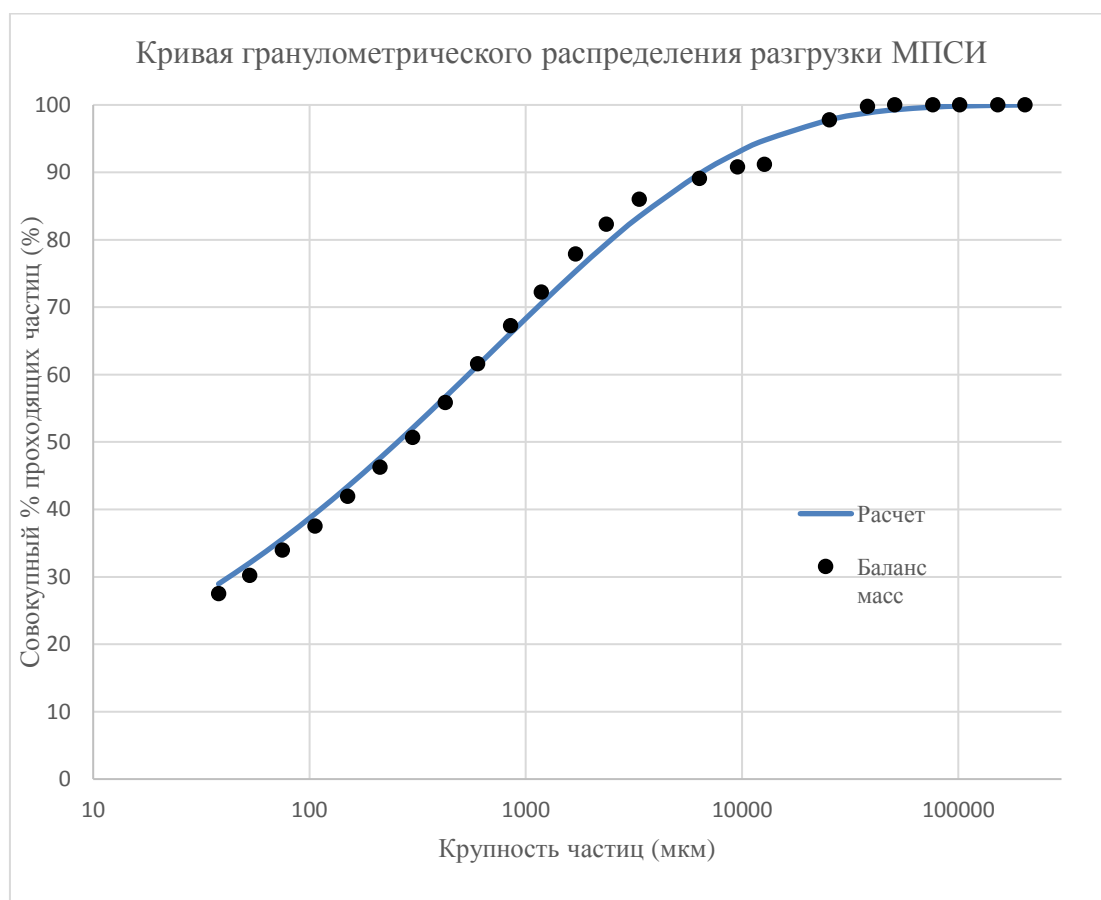


Рисунок 3 – Сравнение кривых гранулометрического распределения разгрузки МПСИ, расчетные значения и данные согласованного баланса масс цикла

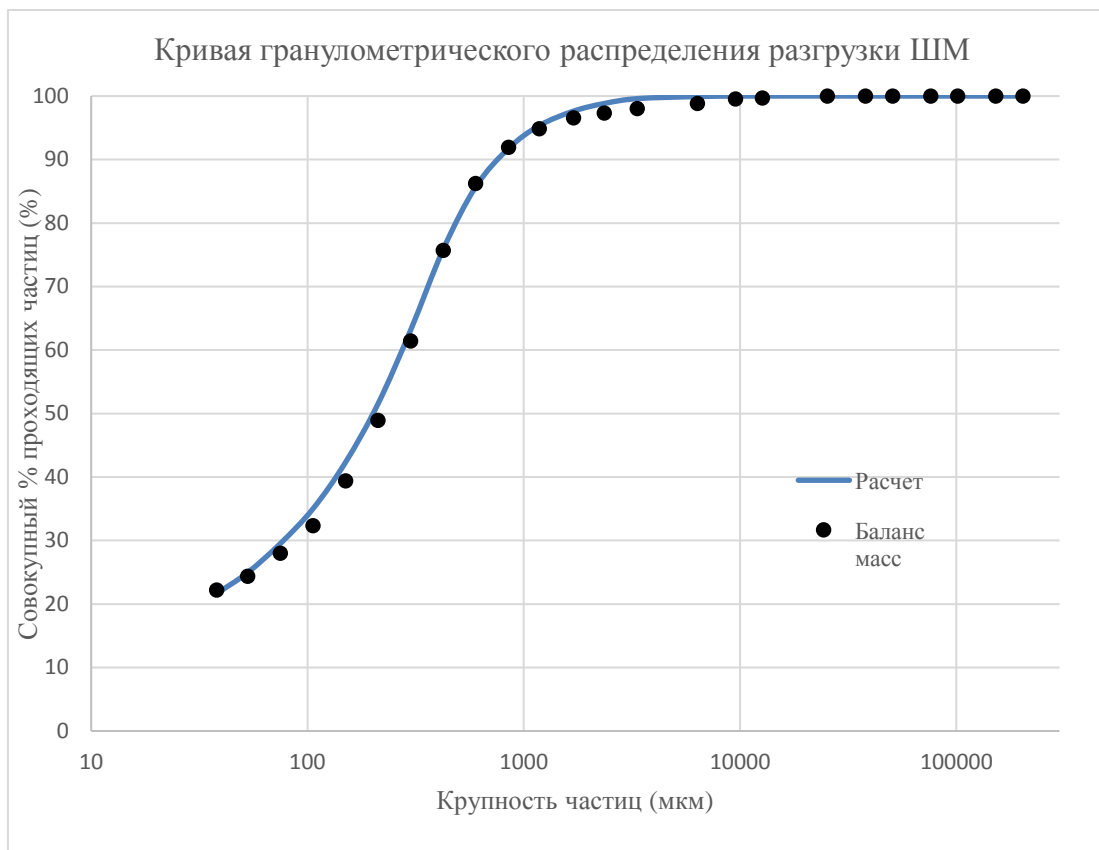


Рисунок 4 – Сравнение кривых гранулометрического распределения разгрузки ШМ, расчетные значения и данные согласованного баланса масс цикла

Симулятор использовался двумя способами: во-первых, для оценки производительности МПСИ по питанию на текущей руде, и, во-вторых, для прогнозирования производительности цикла и других важных показателей процесса в соответствии с действующим планом горных работ.

Модель питателя, включенная в схему, позволяет увеличивать или снижать производительность узла. Совместно с использованием Супервайзера, встроенного в программный пакет USIM PAC модуля для проведения анализа чувствительности, это позволило изучить влияние таких изменений. Таблица 7 показывает результаты анализа чувствительности.

Таблица 7 – Анализ чувствительности производительности цикла измельчения

Питание (т/ч)	d_{80} МПСИ (мкм)	d_{80} ШМ (мкм)	Циркуляционная нагрузка (%)	d_{80} слива ГЦ (мкм)
786	1119	366	247.16	146
829	1214	407	252.34	152
917	1730	505	264.85	165
960	2008	550	274.41	171
1168	2592	652	301.75	180
1265	3272	777	352,80	187

Здесь основным предположением является то, что характеристики руды не изменяются. Другими словами, эти результаты могут отражать ожидаемую производительность цикла измельчения для различного объема питания от одного геологического блока. Как и ожидалось, при прочих равных, снижение объема питания ведет к снижению крупности продукта, в то время как увеличение объема питания ведет к его укрупнению. Самым важным вопросом является определение наилучшего сценария. Фактически это зависит от производительности последующих процессов (флотации, выщелачивания) и от рыночных условий. С технической стороны, если нижестоящие процессы сохраняют хорошую производительность на более крупном питании, повышение производительности увеличит объем продукта и выручку. Впоследствии может быть выполнен и другой анализ, например, влияния мощности мельницы или крупности питания для каждого значения объема, с целью оптимизации операционных условий в цикле.

Вторым применением симулятора является прогнозирование производительности. Хотя производительность является основной целью, симулятор также способен представить множество важных метрик, таких, как d_{80} каждого потока, энергопотребление мельниц, циркуляционную нагрузку, проскок и падение давления в гидроциклонах, и др. Выполненный анализ учитывал план горных работ на следующие два года. Геометаллургические данные представлены в таблице 8.

Таблица 8 – Характеристика руды в различные периоды времени

Период	Удельная энергия SAGDesign (кВт.ч/т)	Индекс работы Бонда (кВт.ч/т)	Удельный вес (т/м ³)
1е полугодие, год n	5.2	13.3	2.84
2е полугодие, год n	5.1	12.1	2.78
1е полугодие, год n+1	6.8	14.7	2.96
2е полугодие, год n+1	6.2	13.6	3.01

Таблица 9 – Прогнозирование производительности цикла измельчения

Период	Произво- дительность (т/ч)	d80p МПСИ (мкм)	d80p ШМ (мкм)	d80p цикла (мкм)
1е полугодие, год n	873	1607	451	170
2е полугодие, год n	873	1572	453	174
1е полугодие, год n+1	746	1952	485	174
2е полугодие, год n+1	820	1997	516	171

Как видно из таблицы 9, симулятор показывает нам базовые сценарии на следующие два года. Зная основные производственные показатели, инженеры-металлурги могут изучить возможности оптимизации производства в каждом периоде. Например, если предполагается отработка крепких руд, возможно увеличения шаровой загрузки в мельницах будет достаточно для сохранения производительности и крупности продукта. Симулятор также может ответить на такие вопросы, как, насколько больше должна быть загрузка, каково будет энергопотребление мельниц в таком случае, и др.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Тест SAGDesign™ является широкоизвестным методом оценки измельчаемости руды в МПСИ. Тест доступен в международном масштабе, хотя бы одна лаборатория аккредитована для его выполнения в наиболее важных горнодобывающих районах: России, Канаде, США, Чили, Перу, Австралии...

Разработанная модель МПСИ, основанная на значении удельной энергии, получаемом в рамках выполнения теста SAGDesign™, позволяет рассчитывать размеры новых мельниц и оценивать производительность уже работающих узлов. Модель рассчитывает различные параметры, такие, как мощность мельницы, потребление удельной энергии и d_{80} продукта.

Ее интеграция в симулятор позволит инженерам с легкостью рассчитывать размеры оборудования в комплексных циклах измельчения, начиная с МПСИ и заканчивая батареями гидроциклонов. В рамках расчета предложенная модель МПСИ позволит оценить производительность цикла измельчения и изучить различные стратегии оптимизации. Она также позволит спрогнозировать производительность цикла в соответствии с данными плана горных работ.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

Austin, L.G., 1990. A mill power equation for SAG mills. Minerals & Metallurgical Processing, Vol 7, n°1, 57-62.

Brochot, S., Wiegel, R.L., Ersayin, S., Touze, S., 2006. Modelling and simulation of comminution circuits with USIM PAC, Advances in Comminution, Kawatra, S.K. (Ed.), SME Inc., Littleton, 495-511.

Morley, C., 2006. High-pressure grinding rolls – a technology review, Advances in Comminution, Kawatra, S.K. (Ed.), SME Inc., Littleton, 15-39.

Mular, A.L., 1982. Mining and Mineral Processing Equipment Cost and Preliminary Capital Cost Estimation. Canadian Institute of Mining and Metallurgy, Vol 25, 59-61.

Starkey, J.H., Hedderson, J.J., Reeves, S.W., Brissette, M., 2015. Tenth anniversary of SAGDesign testing. Production successes and development. Presented at SAG Conference 2015, Vancouver, Canada.

Starkey, J.H., Meadows, D., Thompson, P., Senchencko, A., 2008. SAGDesign Testing Review – Case Studies. Duo, W.D., Yao S.C. (Eds.), Proceedings of the XXIV IMPC. Beijing, 554-563.

Verret, F.O., Chiasson, G., McKen, A., 2011. SAG mill testing – An overview of the test procedures available to characterize ore grindability. SGS Mineral Services Technical Paper 2011-08.

Компания с ограниченной ответственностью Caspeo
BP 36009 - 45060 ОРЛЕАН CEDEX 2 - Франция
Тел.: 02 38 64 31 96 - Факс 02 38 25 97 42 - e-mail: info@caspeo.net

Эксклюзивный дистрибьютор Caspeo в РФ и СНГ:
Вычислительные Системы, ООО
ул. Кутателадзе, 4г, г. Новосибирск, РФ, 630128
Тел.: +7 (383) 214-09-53, e-mail: sales@procsim.ru