

Прогнозирование производительности обогатительной фабрики с использованием геометаллургических данных и расширенного моделирования процессов

Manuel González¹, Stéphane Brochot² и Marie-Véronique Durance²

1. Caspeo Chile SpA, Чили

2. Caspeo, Франция

АННОТАЦИЯ

Развитие геометаллургии сыграло важную роль в вопросах оптимизации рудного и обогатительного переделов в силу активного продвижения идей интеграции соответствующих процессов. Большая часть геометаллургических данных также может быть использована для построения моделей обогатительных фабрик, позволяющих прогнозировать наиболее важные ключевые показатели производительности. Хотя схемы предприятий могут включать один или нескольких циклов, таких, как участки рудоподготовки или флотации, циклы редко интегрируются в единую модель, поэтому возможности прогнозирования в той или иной степени ограничены выбранными ключевыми показателями. Современные платформы для моделирования процессов могут восполнить этот недостаток и предоставить больше достоверной информации, которая поможет инженерам улучшить средне- и долгосрочное планирование, а также в повседневной оптимизации процессов.

Настоящая статья покажет, как за счет совместного применения типовых геометаллургических данных и платформы для расширенного моделирования процессов возможно прогнозировать не только производительность обогатительной фабрики в целом, но и ключевые показатели каждого процесса в отдельности, включая, в том числе, производительность и энергопотребление мельниц, циркуляционную нагрузку, извлечение металла, и др., все одновременно. В начале мы обсудим модели мельницы полусамозмельчения (МПСИ), шаровой мельницы, гидроциклона и флотации, а также методики их калибровки и минимальный объем данных, необходимых для построения комплексной математической модели технологической схемы (симулятора) обогатительной фабрики. Затем, в качестве примера, смоделируем и рассчитаем в программном пакете USIM PAC технологическую схему фабрики для обогащения медьсодержащих руд. Покажем, как симулятор позволит инженерам найти лучшие операционные условия при наличии трех различных руд для питания фабрики. Для оценки неопределенности геометаллургических данных будет выполнен анализ чувствительности.

ВВЕДЕНИЕ

Среди прочих дисциплин, геометаллургия получила широкое распространение в прошедшие годы (Kittler et al., 2011, McCullough, Mutsaers и Jessop, 2013). Фактически она стала играть важнейшую роль на горно-обогатительных предприятиях, которые стремятся интегрировать весь свой бизнес, поскольку помогала совместить стратегии развития горной и металлургической составляющих.

В рамках геометаллургического исследования возможно определить множество данных по рудам. Такие данные обычно включают минералогию, содержания металлов, удельный вес, крепость, флотационную способность руд и др.

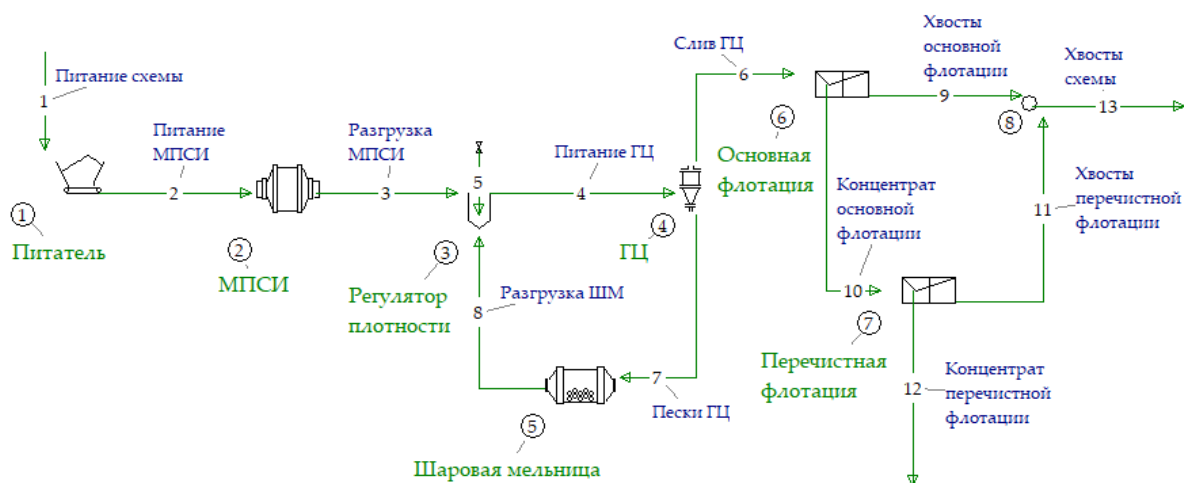


Рисунок 1 Общая схема

Целью настоящей работы является демонстрация того, как, используя типовые геометаллургические данные с производства, возможно прогнозировать производительность обогатительной фабрики и другие ключевые показатели, такие как мощность мельницы или d80 слива гидроциклона. Технологическая схема, использованная в настоящей работе, приведена на рисунке 1. Она включает мельницу полусамоизмельчения (МПСИ), шаровую мельницу, гидроциклоны и две стадии флотации – основную и перечистную.

ОПИСАНИЕ ФАЗОВОЙ МОДЕЛИ

Фазовая модель (модель материала) играет важнейшую роль в любом симуляторе, поскольку она помогает описать обогащаемую на фабрике руду. Фазовая модель симулятора, использованного для целей настоящей работы, включает одну твердую и одну жидкую фазы, а также пульпу, являющуюся их комбинацией.

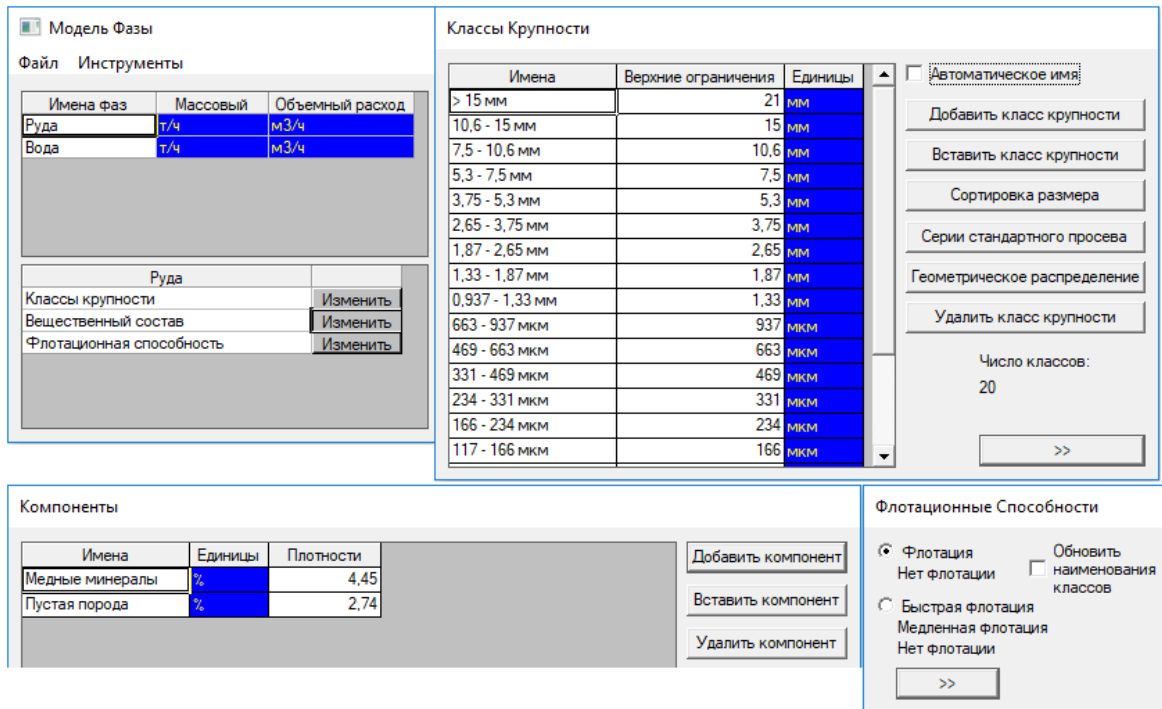


Рисунок 2 Фазовая модель

Программный пакет USIM PAC обеспечивает возможность как простого, так и очень подробного описания руд. В данном случае, модель твердой фазы включает следующие свойства: гранулометрическое распределение, упрощенный минералогический состав и флотационную способность руды. Рисунок 2 показывает фазовую модель в целом и твердую фазу в подробностях.

ОПИСАНИЕ МОДЕЛЕЙ ОСНОВНОГО ОБОРУДОВАНИЯ

Схема, представленная на рисунке 1, включает четыре основных узла: МПСИ, шаровую мельницу, гидроциклоны и флотомшины. Она также включает вспомогательные модели, такие, как питатель и регулятор плотности. В этом разделе мы сфокусируемся на описании основного оборудования: каковы основные уравнения, описывающее поведение узлов, какие данные необходимы для их использования и почему они подходят для построения симулятора в данном случае.

Модель МПСИ

Эта модель была добавлена в программный пакет USIM PAC недавно. Она основана на результатах теста SAGDesign (Starkey, Hindstrom и Nadasdy, 2006) и энергетической теории измельчения. Тест SAGDesign показывает энергию, необходимую для измельчения

метрической тонны руды с d_{80F} в 152,4 мм (питание) до d_{80P} в 1,7 мм (продукт/разгрузка). Существует возможность скорректировать значение энергии, полученное в рамках теста, для расчета энергии в случае, если размеры питания или продукта отличаются от необходимых для его проведения (F_1 и F_3), или если цикл включает галечную дробилку (F_2):

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

Где E это расчетная удельная энергия (кВтч/т), E_{SAG} это удельная энергия, полученная в рамках теста SAGDesign (кВтч/т), F_1 это поправочный коэффициент на размер питания (кВтч/т), F_2 это поправочный коэффициент на галечную дробилку (кВтч/т), F_3 это поправочный коэффициент на размер продукта (кВтч/т).

Удельную энергию E необходимо сравнить с мощностью мельницы. Расчет мощности выполняется в соответствии с следующим уравнением:

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

Где P_W это мощность (кВт), D – диаметр мельницы (м), L – длина мельницы (м), T_b – доля объема мельницы, заполненного шарами (%), T_l – доля объема мельницы, заполненного загрузкой (%), ε – пористость загрузки (%), ρ_s – средний удельный вес руды (т/м³), c_s – процент твердого (%), ρ_b – удельный вес шаров (т/м³), V_r – доля скорости вращения мельницы от критической скорости вращения.

Методология, описанная выше, позволяет рассчитать d_{80P} разгрузки мельницы по d_{80F} питания, энергии SAGDesign, Индексу работы руды и параметрам мельницы.

Для расчета полного гранулометрического распределения разгрузки мельницы предполагается, что оно следует функции Rosin-Rammler:

$$R(d) = 100 - 100e^{-\left(\frac{d}{d_{63.2}}\right)^m} \quad (3)$$

Где $R(d)$ это массовая доля частиц, мельче d , m – наклон функции Rosin-Rammler, $d_{63.2}$ это такой размер, что 63.2 % частиц мельче этого размера.

Эта модель включает два параметра калибровки. Первый используется для корректировки наклона кривой гранулометрического распределения разгрузки мельницы, второй – для корректировки энергопотребления.

Основным геометаллургическим параметром, включенным в эту модель, является удельная энергия SAGDesign. Кроме того, интересен и удельный вес руды, который может играть важную роль в поведении модели.

Модель шаровой мельницы

Модель шаровой мельницы основана на энергетических теориях измельчения и, в частности, на законе Бонда и методах Allis Chalmers для расчета размеров мельниц (Rowland и Kjos, 1978, Brochot et al., 2006). Мощность мельницы рассчитывается по уравнению 4:

$$W_{st} = 4.879D^{0.3}(3.2 - 3T_c)V_r \left[1 - \frac{0.1}{2^{9-10V_r}} \right] + \varepsilon_s \frac{1.102}{50.8}(D_b - 12.5D) \quad (4)$$

Где W_{st} это энергопотребление на метрическую тонну шаров (кВт), D – внутренний диаметр мельницы (м), T_c – доля загрузки: доля объема мельницы, загруженного шарами, V_r – скорость вращения, выраженная в форме доли от критической скорости вращения мельницы, ε_s может равняться 1 для учета заданной пользователем гранулометрии шаров и 0 иначе, D_b – размер самого крупного класса шаровой загрузки (мм).

Уравнение Бонда связывает мощность мельницы с d_{80F} питания и d_{80P} продукта через Индекс работы:

$$E = \frac{10W_I}{\sqrt{d_{80P}}} - \frac{10W_I}{\sqrt{d_{80F}}} \quad (5)$$

Где E это энергия, необходимая для измельчения одной метрической тонны материала требуемого размера (кВтч/т), W_I – Индекс работы для руды (кВтч/т), d_{80P} – d_{80} продукта/разгрузки мельницы (мкм), d_{80F} – d_{80} питания мельницы (мкм).

Метод Allis Chalmers включает возможность применения поправочных коэффициентов к энергопотреблению, до применения формулы Бонда. Полное гранулометрическое распределение продукта мельницы рассчитывается как распределение Rosin-Rammler.

Как и модель МПСИ, модель шаровой мельницы включает два калибровочных параметра. Первый используется для корректировки энергопотребления, второй – для корректировки наклона кривой гранулометрического распределения разгрузки.

Эта модель и точна, и проста в использовании. Основным геометаллургическим параметром, включенным в эту модель, является Индекс работы для руды. Другими параметрами модели являются физические параметры и рабочие настройки мельницы.

Модель гидроциклона

Данная модель основана на эмпирических уравнениях, выведенных в рамках экспериментальных исследований L. R. Plitt (Plitt, 1976). Он предположил, что скорректированная кривая разделения гидроциклона соответствует формуле Rosin-Rammler. Четыре основных эмпирических уравнения характеризуют, явно или неявно, параметры скорректированной кривой разделения и доли проскока, как функцию геометрических параметров циклона и характеристик его питания. Эта модель может учитывать пористость

частиц и струйный эффект, при этом они не были использованы при подготовке нашего симулятора.

Основными параметрами модели являются геометрические размеры гидроциклона. Она не включает геометаллургических данных за исключением крупности через гранулометрическое распределение. Она также неявно учитывает вещественный состав руды. Калибровка модели выполняется по трем основным параметрам: разделению потока, коэффициент полноты разделения кривой разделения (*imperfection*) и скорректированный *d50*. Все эти параметры легко откалибровать по данным предприятия. Одним из преимуществ этой модели является тот факт, что после калибровки на производительность классификации будут влиять такие базовые параметры руды, как удельный вес или гранулометрическое распределение.

Модель флотации

Эта модель основана на представлении флотации каждой частицы руды с использованием кинетического феномена первого порядка. Каждая камера представляет собой идеальный смеситель, характеризуемый средним временем нахождения пульпы τ . Для каждого типа частиц руды:

$$Q_{ci} = Q_{fi} \left[1 - \frac{1}{1 + k_i \tau} \right] \quad (6)$$

Где Q_{fi} это расход твердого частиц типа i в питании камеры, Q_{ci} – расход твердого частиц типа i в пене камеры, k_i – кинетическая константа флотации частиц типа i , τ – среднее время нахождения пульпы.

Константа k_i характеризует кинетику флотации частиц типа i . Поскольку оценить ее значение априори не всегда представляется простым, модель использует более показательную концепцию времени полуфлотации: время полуфлотации это среднее время нахождения, за которое 50% типа частиц попадает в пену. Оно же является основной геометаллургической переменной, включенной в модель.

МЕТОДОЛОГИЯ

Калибровка симулятора

Перед началом использования геометаллургических данных необходимо выполнить калибровку моделей. Такая калибровка обеспечит уверенность в том, что симулятор способен воспроизвести поведение фабрики. Для калибровки симулятора потребуются некоторые экспериментальные данные. Они позволят сравнить результаты расчета моделей до калибровки с фактическими показателями по соответствующим узлам с предприятия.

Калибровочные параметры в свою очередь позволят скорректировать работу моделей для точного воспроизведения экспериментальных данных, использованных для процедуры калибровки.

Инструмент калибровки физических свойств, встроенный в программный пакет USIM PAC, помогает инженерам в процессе калибровки. Утилита рассчитывает значение калибровочного параметра, при котором разница между экспериментальными и расчетными данными для заданной целевой функции минимальна.

Целевая функция может быть выбрана инженером. Например, для калибровки мельниц, целевая функция может учитывать гранулометрическое распределение и расчетную мощность мельницы. Для калибровки гидроциклона удобнее учитывать гранулометрическое распределение и слива и песков.

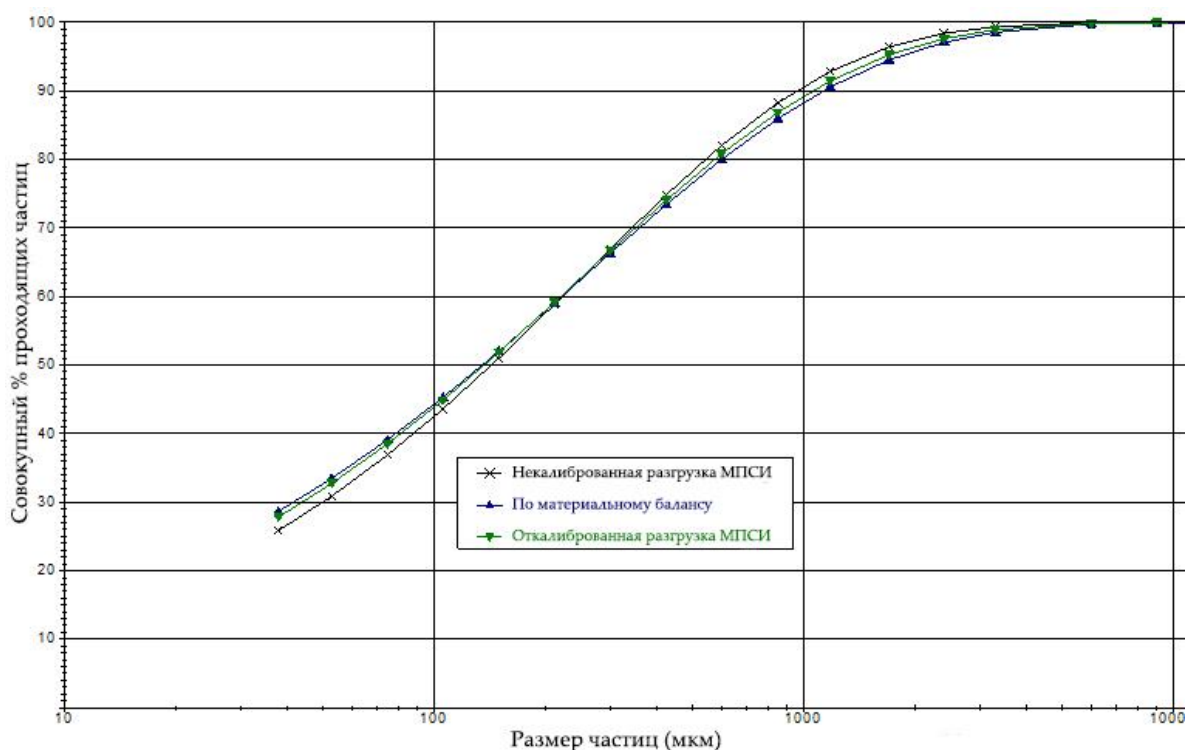


Рисунок 3 Сравнение гранулометрического распределения разгрузки МПСИ

Рисунок 3 показывает сравнение трех кривых гранулометрического распределения разгрузки МПСИ – расчетная без калибровки, расчетная откалиброванная и кривая, полученная из материального баланса. Аналогичные процедуры были выполнены для шаровой мельницы, гидроциклонов и флотомашин.

Таблица 1 Сравнение результатов расчетов и материального баланса

Параметр	Материальный баланс	Симулятор
d80 разгрузки МПСИ (мкм)	600	596
d80 разгрузки шаровой мельницы (мкм)	136	136
d80 питания флотации (мкм)	74	74
Расход концентрата (т/ч)	20.29	20.29
Содержание в концентрате (%)	56.76	56.76
Извлечение основной флотации (%)	80.12	80.17
Извлечение перечистой флотации (%)	97.74	97.68
Сквозное извлечение (%)	78.31	78.31

Таблица 1 показывает сравнение данных материального баланса и результатов расчетов на откалиброванном симуляторе. Результаты показывают хорошую согласованность между показателями предприятия и прогнозом симулятора. Следующим шагом является использование экспериментальных данных для прогнозирования параметров фабрики при изменении руды питания.

Экспериментальные данные

Экспериментальные данные, используемые для расчетов в построенном симуляторе, включают три различных типа руд с фиксированным вещественным составом: медные минералы и пустая порода. Для каждого типа руды известны геометаллургические параметры, такие, как удельная энергия SAGDesign, Индекс работы шаровой мельницы и характеристики флотации (время полуфлотации – T50). Эта информация представлена в таблицах 2 и 3.

Таблица 2 Геометаллургические данные руд

Тип руды	% медных минералов	Удельная энергия SAGDesign (кВтч/т)	Индекс работы шаровой мельницы (кВтч/т)
Руда 1	3.432	8.5	14.8
Руда 2	3.506	9.1	16.5
Руда 3	3.304	8.1	14.1

Таблица 3 Геометаллургические данные руд

Тип руды	Основная флотация		Перечистная флотация	
	T50 медных минералов (мин)	T50 Пустой породы (мин)	T50 медных минералов (мин)	T50 Пустой породы (мин)
Руда 1	10	298	2.2	62
Руда 2	10	300	2.1	62
Руда 3	9	295	2.1	61

Все эти данные будем использовать в расчете. Симулятору также необходимо ожидаемое d80 питания МПСИ. Оценочные значения этого показателя для каждого типа руд представлены в Таблице 4:

Таблица 4 d80 питания МПСИ

Тип руды	SAG mill feed d80F (mm)
Руда 1	156.2
Руда 2	158.4
Руда 3	155.3

При известном d80 питания МПСИ становится возможным использование модели питателя для формирования полного гранулометрического распределения питания, при котором будет сохранен наклон кривой гранулометрического распределения, соответствующей данным, использованным для калибровки.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Первым делом необходимо запустить симулятор с данными каждого типа руд. Содержание медных минералов, извлечение и расходы концентрата и хвостов рассчитываются системой для каждого такого запуска. Результаты представлены в таблице 5:

Таблица 5 Результаты прогнозирования для различных типов руд

Параметр	Руда 1	Руда 2	Руда 3
d80 разгрузки МПСИ (мкм)	597	777	514
d80 разгрузки шаровой мельницы (мкм)	136	191	115
d80 питания флотации (мкм)	74	80	72
Расход концентрата (т/ч)	20.13	20.24	21.23
Содержание в концентрате (%)	57.09	58.77	58.57
Сквозное извлечение (%)	80.39	78.42	83.74

Таблица показывает прогнозные значения некоторых ключевых показателей, которые можно ожидать при обогащении каждого типа руд. Руда 2 обладает самой высокой удельной энергией SAGDesign и Индексом работы, поэтому разгрузка мельниц крупнее и циркуляционная нагрузка также выше. В этом сценарии извлечение может снизиться до 2%. С другой стороны, Руда 3 самая мягкая и симулятор прогнозирует меньшую крупность разгрузки мельниц, а также лучшее сквозное извлечение.

Анализ чувствительности

Обогащение Руды 2 является самым сложным сценарием, с которым может столкнуться обогатительная фабрика. В действующих операционных условиях предприятие может потерять до 2% извлечения. Этот сценарий возьмем за основу анализа чувствительности, который будет выполнен с помощью построенного симулятора. Анализ начали с гипотезы, что обе мельницы обладают ресурсом для увеличения мощности. Первый расчет будет выполнен по параметру процента наполнения мельницы шарами для обеих мельниц. Целью является получение значений d80 питания флотации и энергопотребления мельниц для различных конфигураций значений процента наполнения мельниц шарами. Таблица 6 обобщает полученные результаты:

Таблица 6 Результаты анализа чувствительности

% наполнения мельницы шарами МПСИ – ШИМ	d80 питания флотации (мкм)	Мощность МПСИ (кВт)	Мощность ШИМ (кВт)
11 – 40	81	4746	3427
12 – 42	79	4852	3490
13 – 44	78	4958	3543
14 – 46	77	5064	3586

Конфигурацию 14-46 можно использовать без опасений. Затем симулятор необходимо сконфигурировать с учетом этих значений. Мы также оценили значения времени полуфлотации T50 в 9,8 минут для медных минералов в основной флотации, 298 минут для пустой породы в основной флотации, 2,1 минут для медных минералов в перечистой флотации и 61,8 минут для пустой породы в перечистой флотации. Эти изменения связаны с меньшей крупностью питания флотации и улучшением кинетики. Результаты расчетов с помощью симулятора, учитывающего все эти изменения, показаны в следующей таблице:

Таблица 7 Результаты расчетов с учетом новых операционных параметров

	d80 разгрузки МПСИ (мкм)	d80 разгрузки ШМ (мкм)	d80 питания флотации (мкм)	Расход концентрата (т/ч)	Содержание в концентрате (%)	Сквозное извлечение (%)
Руда 2	597	136	74	20.13	57.09	80.39

В новой конфигурации мощность МПСИ увеличена на 6,7%, мощность шаровой мельницы – на 4,7%. Увеличение мощности привело к меньшей крупности питания флотации и к улучшенной кинетике флотации, а в конечном итоге - к увеличению сквозного извлечения.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Геометаллургия является полезным инструментом, который помогает инженерам улучшить знание месторождения, и координировать сразу несколько областей деятельности предприятия: геологию, горный и обогатительный переделы.

Доступные на сегодняшний день платформы для моделирования и расчета технологических схем, такие, как USIM PAC, могут воспроизводить поведение обогатительной фабрики и с высокой степенью точности прогнозировать эффект от изменения различных параметров, касающихся руды, таких, как Индекс работы, или операционных, таких, как скорость мельницы.

Комбинирование обоих средств позволит лучше оценить влияние одновременного изменения различных параметров на ключевые показатели обогатительной фабрики. Это также поможет инженерам справляться с такими изменениями, позволяя им тестировать различные стратегии для поддержания или улучшения производительности предприятия.

ЛИТЕРАТУРА

Austin, L.G. (1990) 'A mill power equation for SAG mills', *Minerals & Metallurgical Processing*, Volume 7, n^o1, pp 57-62

Brochot, S., Wiegel, R.L., Ersayin, S., Touze, S., (2006) 'Modeling and Simulation of Comminution Circuits with USIM PAC' *Advances in Comminution*, Ed. S.K. Kawatra, SME, Littleton, USA

Kittler, P, Liebezeit, V, Ehrig, K, Macmillan, E and Lower, C (2011) 'It Seemed like a Good Idea at the Time..Common Mistakes in Geometallurgy', First AusIMM International Geometallurgy Conference, AusIMM, Australia, pp 133-138

McCullough, G, Mutsaers, B and Jessop, J (2013) 'Obstacles to Embedding Geometallurgy Decision-Making into Operations and how to Increase Maturity of this Critical Capability', Second AusIMM International Geometallurgy Conference, AusIMM, Australia, pp 139-140

Plitt, L.R. (1976) 'A mathematical model of the hydrocyclone classifier', *CIMM Bull.*

Rowland, C.A. and Kjos, D.M. (1978) Chapter 12, Rod and Ball Mills, *Mineral Processing Plant Design*, Mular, A.L., and Bhappu, R.B, SME, pp 239-278.

Starkey J., Hindstrom S. and Nadasdy G. (2006). "SAGDesign testing – What is it and why it works", SAG Conference 2006, Vancouver, B.C., Canada