

Пример использования USIM PAC: повышение производительности обогатительной фабрики при золоторудной шахте Shila, Перу.

J.-C. Guillaneau, M.-V. Durance, J. Libaude, P. Ollivier and J. Villeneuve

Институт BRGM, Группа обогащения руд

Avenue de Concyr, BP 6009, 45060 Orléans Cedex 2 - France

ТЕЗИС

Операторы обогатительных фабрик сталкиваются с необходимостью выбора между различными вариантами оптимизации своих производств. К сожалению, только некоторые из таких вариантов можно отработать в реальных условиях. Программный пакет USIM PAC позволит в течение нескольких дней отработать множество различных гипотез по оптимизации технологической схемы, чтобы помочь инженерам обогатителям выбрать, проверить, обосновать руководству и внедрить наиболее подходящее решение.

Пример, описанный ниже, это схема дробления и измельчения фабрики при золоторудной шахте Shila, находящейся в совместном владении компаниями CEDIMIN S.A. и BUENAVENTURA S.A. в Перу. В рамках проекта промоделированы несколько вариантов повышения производительности, а соответствующие результаты рассмотрены с точки зрения качества, инвестиционных затрат и потребления энергии. По итогам было внедрено лучшее решение, выбранное с помощью USIM PAC. Решение дало 20% повышение производительности и окупило вложения в течение двух месяцев.

ВСТУПЛЕНИЕ

Моделирование стационарного состояния в наши дни это операционный инструмент для помощи инженерам обогатителям в построении, расчете и оптимизации технологических схем обогатительных фабрик. В примере ниже будет особо подчеркнута необходимость тесного сотрудничества между инженерами обогатителями и специалистами по моделированию. Хотя программный пакет USIM PAC был разработан для инженеров обогатителей, для выполнения работ по оптимизации необходимо базовое знание математических моделей операций и методологий моделирования. При этом качество результатов расчетов USIM PAC напрямую зависит от представительности проб сырья. И только инженер обогатитель сможет выбрать подходящие операционные параметры, которые необходимо оптимизировать, или подходящее оборудование, которое нужно будет внедрить по итогам анализа результатов моделирования.

Проект, описанный ниже, состоял из двух фаз:

1. Аудит фабрики и проверка некоторых предварительных гипотез оптимизации, предложенных обогатителями для повышения производительности.
2. Выбор нового оборудования для постепенного выхода на новые показатели.

ПРОЕКТ

Minera Shila S.A. начала выработку золота и серебра на шахте Shila в южном Перу в 1990 году. Шахта находится в 8 часах езды от города Arequipa в Андах на высоте 5 200 метров над уровнем моря. Обоганительная фабрика находится немного ниже, на высоте 4 650 метров над уровнем моря. Поэтому, среди шахт по добыче золота и серебра, расположение Shila считается одним из самых высоких в мире.

Подземная шахта следует за узкими лентами минерализации, в которых золото представлено в форме мелких частиц металла, содержащегося в сульфидах и кварце, а серебро в форме металла, ассоциированного с золотом, а также в форме тетраэдрита и сульфидов. Плановая производительность завода составляла 100 тонн руды в день с выработкой 8,6 г/т золота и 200 г/т серебра. Руду подвергали гравитационной обработке и флотации для производства золотого и серебряного концентратов, которые затем перевозились для дальнейшей обработки.

Определение проблемы. Спустя несколько месяцев после запуска, оператор шахты решил повысить производительность до 135 т/д. Оборудование изначально выбиралось таким образом, чтобы разрешить подобное увеличение. Однако, вскоре стало понятно, что шаровая мельница не справляется с возросшей нагрузкой. Около 31 т/д сырья отсеивалось грохотом (“Крупное”) и хранилось на внешней площадке.



Рисунок 1. Исходная схема фабрики Shila

Цели оптимизации. Проект состоял из двух фаз:

1. Аудит фабрики и проверка некоторых предварительных гипотез, предложенных обогатителями, для снижения объемов слишком крупного продукта на выходе мельницы (см. рис. 1). Выбранная гипотеза была затем внедрена и опробована операторами фабрики.
2. Выбор нового оборудования для постепенного выхода на новые показатели. Для выбора наилучшей гипотезы оптимизации схемы и выбора наиболее подходящего комплекта оборудования, все заявленные гипотезы были смоделированы и проверены в программном пакете USIM PAC.

ОБЩИЙ ПОДХОД К ПРОЕКТАМ ПО ОПТИМИЗАЦИИ

Проекты по оптимизации обычно выполняются в соответствии с следующей процедурой (см. рис. 2), разделенной на два шага:

1. Создание модели действующей фабрики.
2. Отработка различных гипотез оптимизации и анализ результатов в техническом плане (характеристика продуктов, потребление энергии по основным узлам) и экономическом плане (расчет инвестиционных затрат).

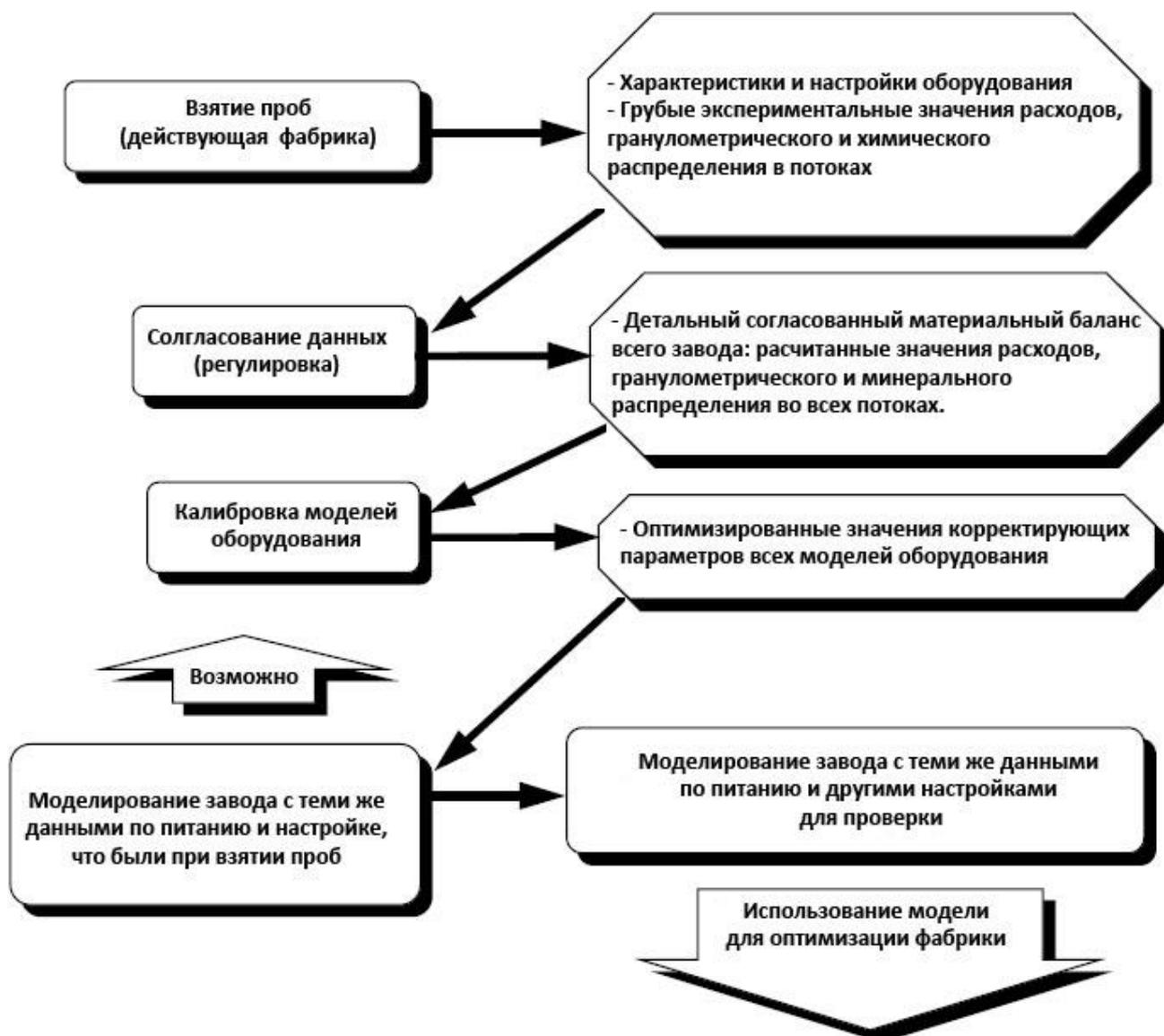


Рисунок 2. Методология оптимизации.

Моделирование действующего завода

Определение модели руды. В связи с тем, что в каждом отдельном случае руда, обрабатываемая на фабрике, это сложная смесь множества частиц, математические модели, используемые для моделирования оборудования, не могут принять во внимание все такие частицы в общем случае. Поэтому, для каждого проекта пользователь должен определить модель руды. В частности, необходимо указать основные свойства руды, такие, как число и названия минералов, их удельную плотность и другие физические свойства, число классов крупности и их свойства [Durance et al., 1992].

Описание потоков фабрики и согласованный материальный баланс. Описание потоков может включать расход жидкого и твердого, распределение минералов в каждом классе крупности. Для получения всех необходимых данных, в действующей фабрике собирают пробы. Этот этап проекта требует тесного сотрудничества между оператором фабрики и специалистом по моделированию. Тем не менее, из-за неоднородности пульпы и сложных условий сбора проб, часть параметров часто измеряются неточно, а значения некоторых из параметров и вовсе можно только оценить. Для согласования данных в USIM PAC используются алгоритмы расчета материального баланса BILCO, учитывающие собранные данные и погрешность такого сбора [Guillaneau et al., 1992].

Выбор и калибровка математических моделей. Для каждого узла оборудования в USIM PAC существуют несколько моделей операций. Некоторые из них не предсказывают поведение узла и рассчитывают только значения потоков выхода продукта на основе производительности, заданной пользователем. Такие модели, которые иногда называют “схематичными”, не адаптированы для задач по оптимизации

действующих фабрик, поскольку не учитывают размеров оборудования. Другие модели действительно предсказывают поведение оборудования. Большинство из таких моделей являются феноменологическими и рассчитывают выход продукта и потребление энергии, как функцию питания, размеров и параметров оборудования [Broussaud et al., 1990].

Для таких моделей можно описать три типа параметров [Conil et al., 1988]:

1. Размерные параметры, т.е. физически явные параметры, которые можно рассчитать (размеры, параметры оборудования).
2. Параметры, без явных атрибутов, которые можно определить в эксперименте (кинетика флотации, функция дробления).
3. Корректирующие параметры, которые можно определить используя тестовые или операционные данные с действующего производства. Для построения модели действующего завода, такие параметры регулируются в соответствии с согласованным описанием потоков.

Каждая модель калибруется и в дальнейшем может воспроизводить действующий узел оборудования с той же точностью, которую получили при взятии пробы.

Моделирование. Когда все модели откалиброваны, основной алгоритм USIM PAC вступает в силу для воспроизведения деятельности всей фабрики. Пользователь затем должен сравнить расчетные и экспериментальные данные для проверки корректности модели.

Моделирование оптимизации действующего завода

Когда модель завода построена и проверена, пользователь может изменить некоторые из ее компонент в части описания питания, описания параметров оборудования, конфигурации оборудования в схеме. Новое моделирование на такой обновленной модели будет показывать влияние таких изменений. Если каждое изменение тестировалось отдельно, пользователь получает возможность сравнить соответствующее влияние каждого изменения на выход продуктов и потребление энергии, а затем выбрать наиболее подходящую конфигурацию оборудования для поставленной оптимизационной задачи.

ФАЗА 1. УМЕНЬШЕНИЕ РАСХОДА “КРУПНОГО” НА ФАБРИКЕ SHILA

Моделирование действующего завода.

Схема. Схема дробления и измельчения указана на рис. 1. Основная щековая дробилка Denver (38см x 61см) уменьшает руду, поступающую с шахты, с 300 мм максимум до 75 мм максимум. Двухдечный виброгрохот затем отделяет 12,5 мм сырье от продукта дробления. Крупный продукт с грохота далее загружается в стандартную 90 мм коническую дробилку Symons, работающую в открытом цикле. После чего мелкий продукт с грохота, а также продукт с дробилки Symons, сгружаются в корзину на 200 тонн. Узел дробления работает по 6 часов в день. Мельница Allis Chalmer (1,8м x 1,8м) измельчает раздробленную руду до 200 мкм в закрытом цикле с 35,6см циклоном. Отсадочная машина, установленная между разгрузкой мельницы и циклоном, восстанавливает свободные частицы золота.

Модель руды. Для проверки возможных изменений схемы, была построена ее действующая модель. Модель сырья, которая применялась для описания потоков, на данном этапе состояла только из одного минерала – руды. Этого было достаточно, поскольку на данном этапе мы не учитывали селективности помола мельницы. Учитывали только часть завода, отвечающую за измельчение. Руда определялась с средней плотностью в 2.8 и десятью классами крупности от 19 050 мкм до 1 мкм.

Модели оборудования. Модель щековой дробилки — эмпирическая модель, в которой гранулометрическое распределение и выход продукта определялись на основе опубликованных промышленных данных. Модель конической дробилки использует БД функцией дробления и классификации, предложенную W. J. Whiten [1974]. Модель шаровой мельницы построена на основании теорий энергии дробления и на методах определения размеров мельниц измельчения (закон Бонда и

метод Allis Chalmers) [Rowland et al., 1980]. Для гидроциклона использовалась модель Plitt [Plitt et al., 1990, 1991].

Все модели были откалиброваны в соответствии с согласованным описанием потоков. Основные расчетные данные сравниваются с данными проб в первых двух строках Таблицы 1.

Новые конфигурации.

Следующие три гипотезы были предложены обогатителями для повышения производительности фабрики путем снижения расхода “Крупного” с уменьшением d80 питания схемы флотации.

1. Добавление вторичной дробилки в закрытом цикле с грохотом, см. рис. 3.
2. Уменьшение размеров отверстий конической дробилки.
3. Замена мельницы 1,8м x 1,8м на мельницу 2,1м x 1,8м, которую можно было найти в регионе.

Предложенные гипотезы были смоделированы с потоком в 150 т/д. Основные результаты представлены в Таблице 1 ниже.

Название	Закрытый цикл	Размер отверстий конической дробилки (мм)	Шаровая мельница (м)	Расход “Крупного” (т/д)	d80 питания схемы флотации (мкм)
Существующая фабрика (проба)	Нет	13	1,8 x 1,8	31	270
Существующая фабрика (расчет)	Нет	13	1,8 x 1,8	31	290
1.	Да	13	1,8 x 1,8	9	210
2.	Нет	10	1,8 x 1,8	19	290
3а.	Нет	13	2,1 x 1,8	15	200
3б.	Да	13	2,1 x 1,8	5	150

Таблица 1. Сравнение пробных и расчетных данных.

Технические выводы первого этапа оптимизации (снижение расхода “Крупного”)

- Интеграция вторичной конусной дробилки в закрытом цикле дает лучшую оптимизацию работы шаровой мельницы. Расход крупного продукта с грохота (поток №9 “Крупное”) делится на три, а d80 питания схемы флотации составляет всего 210 мкм вместо 270 мкм.
- Снижение размера отверстий конической дробилки дает худшую оптимизацию. Расход “Крупного” уменьшается только на 30%, а d80 продукта остается на уровне в 270 мкм.
- Замены мельницы 1,8м x 1,8м на мельницу 2,1м x 1,8м улучшает результат только если коническая дробилка включена в закрытый цикл. Расход “Крупного” при этом становится незначительным, а d80 падает до 150 мкм.

Последняя конфигурация была принята руководством фабрики и использована для производительности в 135 т/д. При такой производительности, расход “Крупного” составляет всего несколько тонн в день. Инвестиции в изменение схемы окупались в течение двух месяцев.

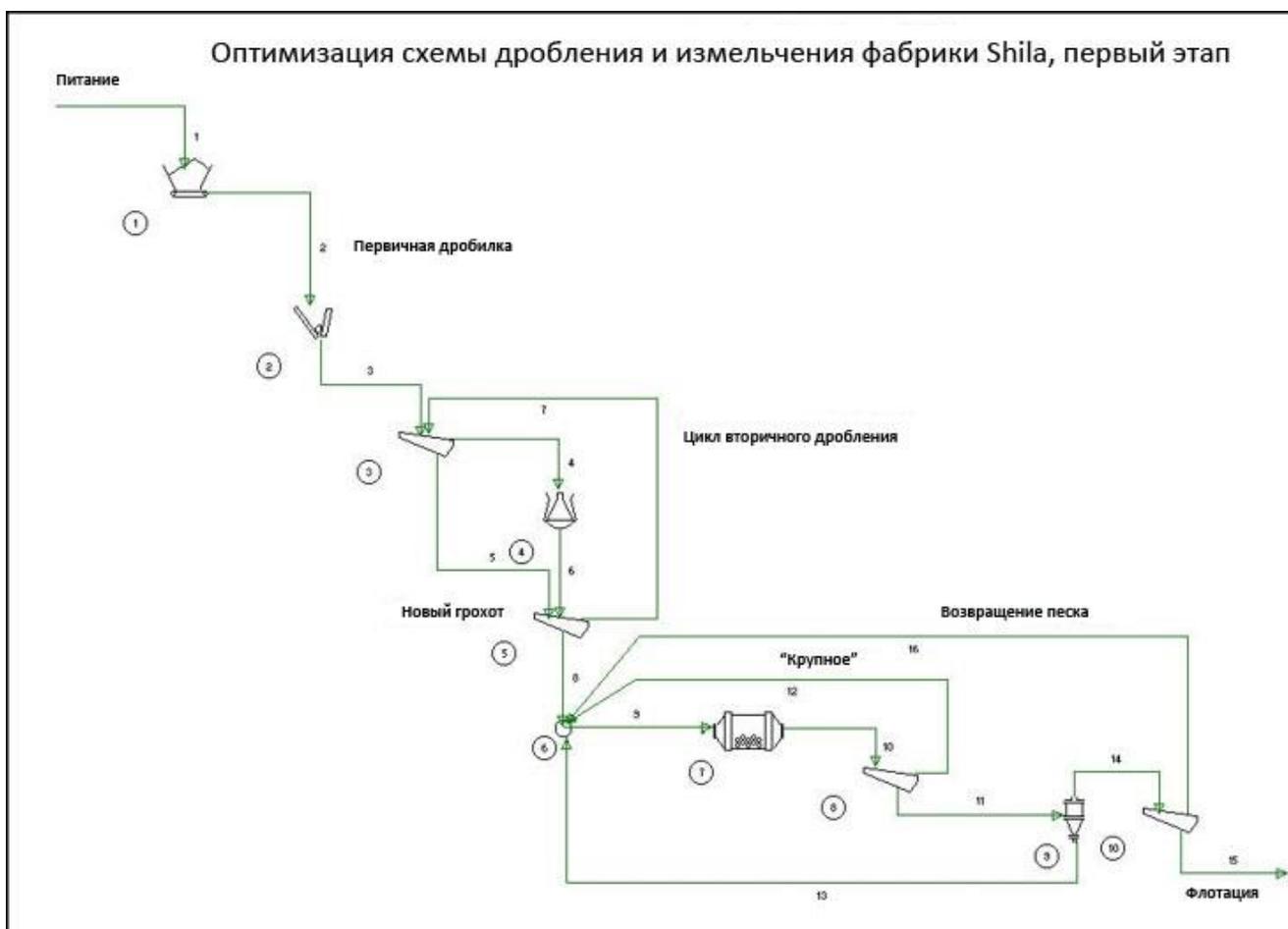


Рисунок 3. Схема дробления и измельчения, предложенная для снижения расхода “Крупного”

ФАЗА 2: УВЕЛИЧЕНИЕ ПРОИЗВОДИТЕЛЬНОСТИ ФАБРИКИ SHILA

Адаптировав модифицированную технологическую схему путем включения вторичной дробилки в закрытый цикл с грохотом, оператор фабрики позднее решил увеличить производительность с 135 т/д до 230 т/д.

Моделирование действующей схемы

Оператор провел новую пробу и создал в USIM PAC рабочую модель обновленной технологической схемы. Основные параметры первого расчета, такие, как модель руды и параметры моделей оборудования, были сохранены. Согласование материального баланса было запущено с вновь собранными тестовыми данными, затем в соответствии с результатами были откалиброваны модели узлов.

Модификации

Следуя идеям, предложенным оператором и обогатителями, а также принимая во внимание местные возможности (включая, например, территориальное наличие того или иного оборудования в регионе рядом с производством), шесть различных конфигураций были отработаны с использованием модели.

1. Смена шаровой мельницы 1,8м x 1,8м на шаровую мельницу 2,1м x 1,8м
2. Смена шаровой мельницы 1,8м x 1,8м на шаровую мельницу 2,4м x 2,4м
3. За – 3б. Добавление стержневой мельницы в роли третьей стадии дробления к питанию схемы дробления (были испробованы два варианта загрузки мельницы, см. Таблицу 2)
4. Использование двух шаровых мельниц 1,8м x 1,8м и 2,1м x 1,8м параллельно
5. Использование двух шаровых мельниц 1,8м x 1,8м и 2,1м x 1,8м последовательно



Рисунок 4. Технологическая схема, предложенная для второго этапа оптимизации.

Основные результаты моделирования представлены в Таблице 2.

Название	Мельница первичного измельчения	Мельница вторичного измельчения	Расход "Крупного" (т/д)	Потребление энергии (кВт/т)	d80 питания схемы флотации (мкм)
1.	-	Шаровая мельница 2,1м x 1,8м	45	12	210
2.	-	Шаровая мельница 2,4м x 2,4м	8	22	175
3а.	Стержневая мельница (1,5м x 3м), загрузка 35%	Шаровая мельница 1,8м x 1,8м	1	16	140
3б.	Стержневая мельница (1,5м x 3м), загрузка 20%	Шаровая мельница 1,8м x 1,8м	8	14	195
4	-	Две шаровые мельницы параллельно (1,8м x 1,8м и 2,1м x 1,8м)	9	20	180
5	Шаровая мельница 2,1м x 1,8м	Шаровая мельница 1,8м x 1,8м	5	20	180

Таблица 2. Сравнение различных конфигураций схемы второго этапа оптимизации

Технические выводы второго этапа оптимизации (повышение производительности схемы)

- Замена шаровой мельницы 1,8м x 1,8м на шаровую мельницу 2,1м x 1,8м не оказывает существенного влияния на повышение производительности. Поток “Крупного” становится слишком важным и его нельзя отправить в циркуляцию.
- Замена мельницы 1,8м x 1,8м на большую шаровую мельницу 2,4м x 2,4м дает хорошие результаты в плане процесса, однако, показатели потребления энергии слишком высокие.
- Использование двух шаровых мельниц последовательно или параллельно дает удовлетворительные результаты по показателю расхода “Крупного”, однако потребление энергии также относительно высокое. Небольшая разница между этими двумя вариантами объясняется неэффективностью мельницы первичного измельчения (2,1м x 1,8м) в случае последовательного расположения. Скорость подачи питания слишком высокая для ее размеров. Другой причиной может быть плохая эффективность гидроциклона. Этот узел в текущих условиях обрабатывает не так корректно как должен и создает дополнительную циркуляционную загрузку.
- Добавление стержневой мельницы в схему дает интересный результат. Цели достигаются с стержневой мельницей, загруженной стержнями лишь на 20%. Поскольку данное решение имеет достаточно большой размер, это направление можно исследовать дальше. С точки зрения потребления энергии, это представляется наилучшим решением (см. рис. 4).

ВАЖНОСТЬ СОВМЕСТНОЙ РАБОТЫ ПРИ ВЫПОЛНЕНИИ ПРОЕКТОВ ПО ОПТИМИЗАЦИИ

Проект Shila показал, что практически на каждом шаге проекта по оптимизации необходимо тесное взаимодействие между обогатителями и специалистами по моделированию. Оптимизационное исследование может быть выполнено единственным специалистом только в том случае, если он обладает богатым опытом в моделировании, существенными знаниями в обогащении полезных ископаемых, а также владеет ситуацией по текущей операционной деятельности проектной фабрики. Большинство обогатителей сегодня использует ноутбуки при проведении аудита фабрик. Ноутбук в таких полевых условиях можно использовать для составления заметок и проведения несложных финансовых подсчетов, однако, наилучшим образом его можно применить путем использования комплексного программного обеспечения по моделированию технологических процессов, такого, как USIM PAC.

Два этапа оптимизации были проиллюстрированы на примере проекта Shila. Первый этап включал использование USIM PAC для проверки и перевода в цифры идей, высказанных инженерами-обогатителями. На этом этапе результаты расчетов использовались для того, чтобы убедить менеджмент предприятия в значимости оптимизации фабрики и в быстрой окупаемости такой оптимизации. В след за этим было решено провести второй этап. Найденное решение также было внедрено и первые результаты удовлетворили руководство предприятия.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Программные пакеты для инженеров-обогатителей существуют уже много лет и находят все большее применение по всему миру. Команда авторов USIM PAC постоянно совершенствует свой продукт в вопросах интуитивности интерфейса, повышения эффективности, точности и простоты проведения расчетов, количества доступных моделей операций и алгоритмов выполнения вычислений [Broussaud et al., 1991; Villeneuve et al., 1992; Guillaneau et al., 1992].

Основным вызовом для такого рода программ на сегодня является их принятие обогатителями на вооружение в качестве базового рабочего инструмента. Для этого необходимо обеспечить должный уровень простоты и интуитивности использования, а также качественную техническую поддержку и обучение. Взаимодействие между обогатителями и специалистами по моделированию (которые часто также имеют опыт в обогащении полезных ископаемых) это хороший способ достичь поставленной цели. В настоящем примере проиллюстрированы не только точность и качество достигнутых результатов, но и важность взаимодействия, позволяющего делать хорошо документированные (с техническими и экономическими аргументами) предложения по оптимизации для собственников предприятий в течение всего нескольких дней.

БЛАГОДАРНОСТИ

Авторы статьи благодарят компанию Minera Shila S.A. за ее согласие на публикацию данной статьи.

Эксклюзивный дистрибьютор USIM PAC в РФ и СНГ:
Вычислительные Системы, ООО
ул. Кутателадзе, 4г-238, г. Новосибирск, РФ, 630128
Тел.: +7-383-214-09-53, e-mail: sales@procsim.ru