

# Создание математической модели обогатительной фабрики на месторождении Kiruna компании LKAB с помощью программного пакета UsimPac

P. Soderman, U. Storeng, P. O. Samskog (LKAB, Швеция)  
O. Guyot, A. Brossaud (Control International S. A., Франция)

## Аннотация

LKAB начали строительство новой обогатительной фабрики на месторождении Kiruna с производительностью в 5 миллионов тонн в год. Схема нового цикла измельчения является инновационной и очень важной, в связи с тем, что она целиком основывается на свойствах дробления руды. Он включает в себя две стадии измельчения, первая стадия является закрытым циклом самоизмельчения, вторая – помол в галечной мельнице. Критический класс крупности магнетит извлекают из мельницы самоизмельчения и используют в качестве гальки на второй стадии.

В 1992 году LKAB решили адаптировать и использовать программный пакет UsimPac для создания математической модели фабрики. Для работы была собрана команда, включающая в себя, как специалистов по математическому моделированию процессов, так и инженеров-технологов с производства. Работа включала в себя разработку феноменологической модели галечной мельницы и адаптацию существующей модели мельницы самоизмельчения компании Control International. Параметры моделей были определены из результатов опытных испытаний. Кроме этого, для определения калибровочных коэффициентов и функций отбора, необходимых для корректного моделирования дробления в галечной мельнице для различных типов гальки и руды, были проведены специальные лабораторные тесты.

Созданная математическая модель схемы использовалась проектной командой для сравнения различных вариантов схемы (одна или две линии, различные конфигурации схемы переработки), для прогнозирования влияния изменений объема питания фабрики и содержания ценного компонента в питании, а также для проверки нескольких вариантов размеров оборудования. Более того, математическая модель помогла глубже понять процессы и методику взаимодействия различных обогатительных операций в случае данной конкретной схемы.

## I. Введение

В последние 10 лет было представлено большое число применений математического моделирования для расчета операций измельчения. Большая часть из них относилась к оптимизации действующих фабрик или к предварительному проектированию на ранних стадиях проектов. Применение, приведенное в настоящей статье, обладало рядом оригинальных особенностей:

- Основной целью работы было создание реалистичной математической модели комплексной обогатительной фабрики для финальной стадии проектирования и инженерной обработки. Модель должна была быть гибкой к операциям, входящим в схему. Это обозначает, что процесс уже был достаточно определенным и для его доводки необходимо было максимально точное моделирование. В то же время, необходимых для настолько точного моделирования, операционных данных существующего производства еще не было. Поэтому требуемые калибровочные коэффициенты необходимы было вывести или из параметров какого-либо другого существующего производства, или из результатов пилотных и лабораторных испытаний;
- Моделируемая схема (интегрированный закрытый цикл самоизмельчения, закрытый цикл с галечной мельницей с рудной галькой и магнитной сепарацией) была сложнее схем, смоделированных ранее;

- Модель была разработана мультидисциплинарной командой, включающей как инженеров технологов, так и специалистов по математическому моделированию процессов.

## **II. LKAB, крупнейший производитель железной руды в Западной Европе**

LKAB, шведская группа компания, являющаяся крупнейшим производителем концентрата железной руды в Западной Европе. LKAB ежегодно производит порядка 20 миллионов тонн обработанной железной руды, объем продаж составляет порядка 500 миллионов долларов США. В группе работает порядка 3500 человек. Более половины производства составляют окатыши из оливина для доменных печей и окатыши для прямого получения металла. LKAB также производит агломерат с низким содержанием фосфора и небольшое количество материала с высоким содержанием фосфора. Шахты и фабрики расположены в Шведской Лапландии, на севере арктического полярного круга, в Kiruna, Malmberget и Svappavaara. Последовательные инновации и рациональный менеджмент объясняют хорошие экономические показатели компании, несмотря на сложные природные условия, падение индустрии производства стали и существенную конкуренцию на рынке.

В 1992 году LKAB утвердила новую программу расширения на 4 миллиарда шведских крон, включающую инвестиции в шахту и обогатительную фабрику. Обработывающая часть этой программы расширения, под названием SAK 2000, включает в себя строительство новой обогатительной фабрики (см. рисунок 1) и нового завода по производству окатышей (см. рисунок 2) в Kiruna. Новый завод повысит производство окатышей до 4х миллионов тонн в год. Время, выделенное на планирование и строительство, составляет два года. Ожидается, что окатыши с нового завода будут доступны с начала 1995 года.

## **III. Новая обогатительная фабрика в Kiruna**

Технологическая схема, в итоге реализованная на новой обогатительной фабрике (KA2) показана на рисунке 3.

Руда с высоким содержанием фосфора (<100мм) будет по большей части обрабатываться на новой фабрике. Процесс обогащения будет также включать в себя выделение фосфора с помощью флотации в существующем флотационном цикле. Существующая фабрика (KA1) будет работать с рудой с низким содержанием фосфора без флотации. Если это будет необходимо, возможность обработки на KA1 с использованием флотации, также останется.

Сырая руда подается по ленточным конвейерам в три бункера около KA2. Два бункера обладают вместительностью в 3500 тонн каждый (<100мм), третий – 1000 тонн (>80мм). Полностью заполненных бункеров достаточно для поддержки производства на несколько часов. С целью снижения сегрегации сырья, бункеры ссыпают руду по очереди. Сырье затем подается по конвейерам в обогатительную фабрику на первую стадию измельчения.



Рисунок 1. Проект SAK 2000, строительство новой обогатительной фабрики.

Мокрое первичное измельчение происходит в двух мельницах самоизмельчения (6,5м x 5,3м). Это новый технологический процесс для LKAB. Производительность двух линий составляет 700 т/ч и 800 т/ч.

Материал, вытекающий из мельниц, подается на барабанное сито, после которого фракция 10-35мм (критический класс) становится рудной галькой, а фракция <10мм накапливается в спиральный классификатор. Затем мелкий продукт идет дальше в процесс, а крупный продукт возвращается в мельницы самоизмельчения.

Пульпа из процесса самоизмельчения подается на магнитные сепараторы. Магнетитовый концентрат подается на вторичное измельчение в галечные мельницы, а пульпа с хвостами - на новый сгуститель. Вторая стадия измельчения состоит из двух галечных мельниц (6,5м x 8,5м), установленных рядом с МСИ на КА2. Среда для измельчения представляет собой гальку критического размера, взятую из цикла самоизмельчения. Избыток материала размера 10-35мм, лишней для галечного измельчения, дробится и возвращается в стадию самоизмельчения.

Материал, вытекающий из галечных мельниц, подается на барабанное сито. Сырье размером >4мм идет в циркуляционную нагрузку на МСИ, материал <4мм подается на гидроциклоны для классификации. Пески гидроциклонов идут в циркуляцию галечных мельницы после магнитной сепарации. Слив гидроциклонов идет дальше по процессу: две стадии магнитной сепарации, флотацию (на существующем заводе) и финальную магнитную сепарацию.

#### **IV. Проектирование нового процесса**

Процесс измельчения, адаптированный для новой обогатительной фабрики в Kiruna, позволил значительно снизить операционные затраты, поскольку он не требовал поставок специализированного сырья для измельчения (стержни, шары, цельпесы) и ликвидировал необходимость стадии предварительного мелкого дробления. Кроме того, на новой фабрике

рудная галька будет изнашиваться и смешиваться с измельченным продуктом. На существующей фабрике в Kiruna подавалась галька из пустой породы. Полученную в результате износа такой гальки пустую породу также нужно было удалять.

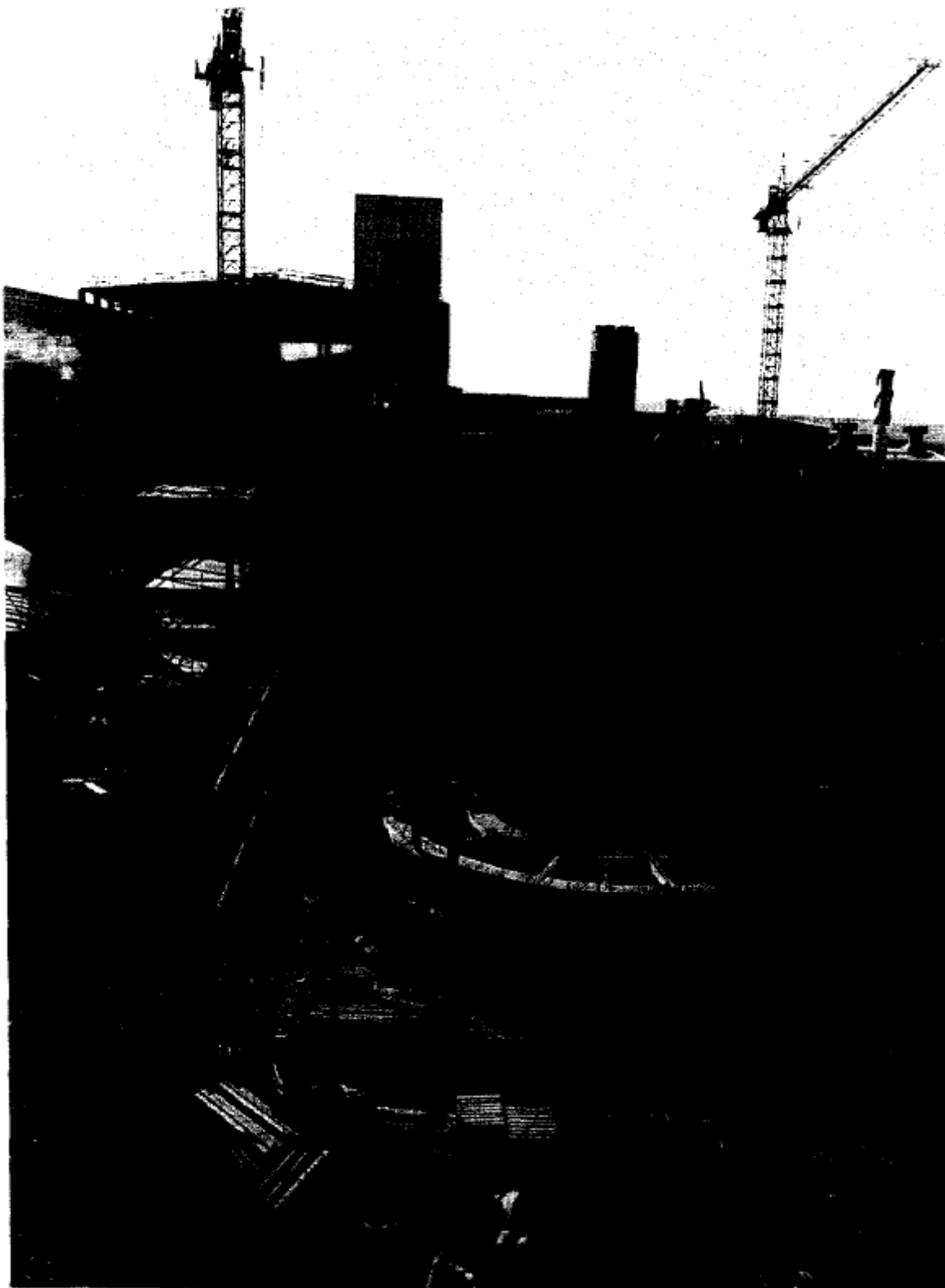


Рисунок 2. Проект SAK 2000, строительство новой фабрики по производству окатышей.

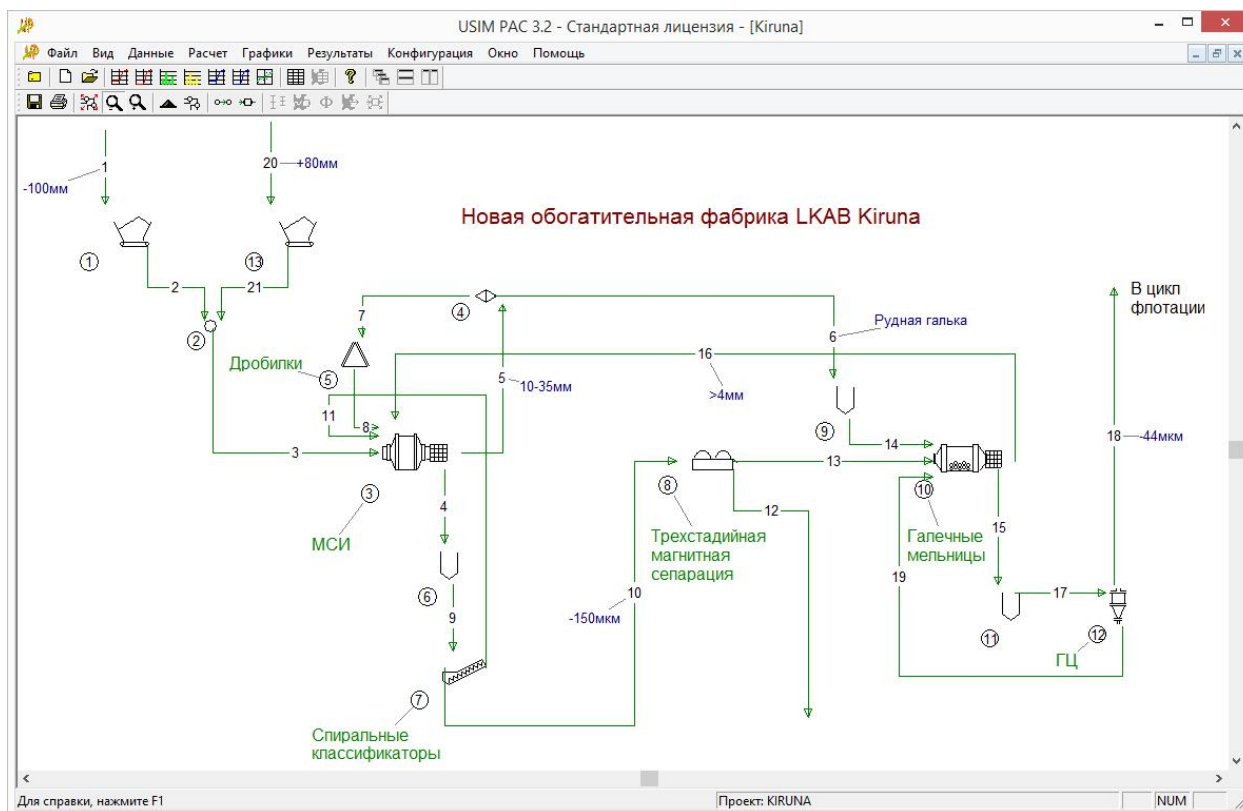


Рисунок 3. Упрощенная технологическая схема новой обогатительной фабрики в Kiruna.

Вместе с тем, новый процесс измельчения был достаточно сложным. Основные причины следующие:

- Процесс опирается на самоизмельчение и, как следствие, очень чувствителен к изменениям измельчаемости руды (крепости) в сравнении с ситуацией, если бы была стадия измельчения в шаровых мельницах;
- С двумя замкнутыми циклами измельчения и тремя связями между первой и второй стадией, взаимодействие процессов очень сильное: (1) основной рудный поток, обрабатываемый на первой стадии, является питанием и для второй стадии, (2) галька для галечной стадии извлекается из стадии самоизмельчения, (3) сырье крупностью >4мм извлекается из галечных мельниц и подается назад в МСИ.

В таком контексте, окончательный выбор базовых процессов (самоизмельчение / измельчение рудной галькой) и их проектирование подразумевало принятие ряда решений, таких как: число линий, конкретная технологическая схема, размеры ячеек барабанных сит, диаметры и длины мельниц, размеры спиральных классификаторов и гидроциклонов, и пр. Более того, проектирование новой фабрики было важной задачей, в которой участвовала масса специалистов компании LKAB из самых разных направлений. В качестве примера объема выполненной работы, пилотный завод мощностью 200 т/ч работал несколько месяцев для оценки возможности применения технологии самоизмельчения в Kiruna.

## V. Моделирование и расчеты

Математическое моделирование было одним из инструментов, используемых в LKAB для оценки эффективности и завершения проекта новой фабрики. LKAB понимали, что принятые проектные и инженерные подходы, несмотря на то, что являются необходимыми, ограничены в следующих аспектах:

- Оперативное тестирование большого числа конфигураций будущей фабрики;
- Принятие во внимание очень тесное взаимодействие между внутренними циклами схемы;
- Понимание и прогнозирование поведения схемы для различных операционных условий и характеристик питания.

Поэтому LKAB приняли решение использовать математическое моделирование новой фабрики в качестве вспомогательного средства для подготовки финального проекта и его реализации.

Департамент исследований LKAB использовал программный пакет UsimPac уже несколько лет. Вместе с тем, размах новой задачи (конечный проект крупной инновационной фабрики) и его технологические условия требовали особого структурированного профессионального подхода.

Базовая структура UsimPac, которая позволяет моделировать комплексные технологические схемы, сочетающие различные операции измельчения, классификации и сепарации, была идеально адаптирована к проекту. Вместе с тем, была необходима разработка моделей для специализированных операций:

- UsimPac изначально не содержал модели галечной мельницы;
- Существующая модель мельницы самоизмельчения не была полностью адаптирована к проекту, в особенности в части моделирования извлечения гальки;
- UsimPac изначально содержал только упрощенную модель магнитной сепарации.

Также, в связи с тем, что получить реальные операционные данные с действующей аналогичной фабрики не представлялось возможным, критичной была функциональность оценки параметров модели. Более того, модели должны были быть откалиброваны с использованием различных массивов данных пилотных испытаний и эксплуатационных условий существующих предприятий. Дополнительно к этому, с целью определения параметров модели галечной мельницы и скорости износа магнетитовой гальки, были выполнены специальные лабораторные тесты в области измельчения галькой.

Для этих целей LKAB выделила отдельную команду специалистов в области процессов обогащения полезных ископаемых. В рамках проекта команда была обучена методикам использования UsimPac и методологии математического моделирования во Франции. LKAB также попросила компанию Control International разработать специализированные модели и рассчитать параметры таких моделей в тесном взаимодействии с командой LKAB, со следующей конечной целью:

- Предоставить LKAB программный пакет для математического моделирования процессов, достаточно мощный и гибкий для расчета новой фабрики в соответствии с имеющимися требованиями (фактически – адаптированную и доработанную версию UsimPac);
- Передать специалистам LKAB знания и ноу-хау в части выгодного самостоятельного использования программного пакета и встроенных математических моделей.

Компании LKAB и Control International решили работать совместно. Данный проект был одной из многих работ по оптимизации, выполненных в рамках действия формального договора о сотрудничестве. Таких, как установка автоматизированных систем экспертного контроля на основе математического моделирования (MBEC – Model-Based Expert Control systems) на действующих фабриках измельчения и флотации.

## VI. UsimPac для Windows

По сути, симулятор (комплексная математическая модель) стационарного (устоявшегося) состояния обогатительной фабрики — это программный пакет для математического моделирования и прогнозирования производительности фабрики в стационарном (устоявшемся) состоянии, как функции от ее питания, ее технологической схемы и других характеристик.

Моделирование стационарного (устоявшегося) состояния не соревнуется с динамическим моделированием. Оно не является более высоко- или низкоуровневым моделированием. В то время, как динамическое моделирование используется для разработки политики контроля процессов, моделирование стационарного (устоявшегося) состояния, как правило, используют для проектирования и оптимизации процессов без привязки к динамике.

UsimPac (Brossaud, 1988; Brossaud et al., 1990, 1991; Guillaneau et al., 1993) является продвинутым программным пакетом для моделирования обогатительных фабрик, предоставляющим набор различных функциональных возможностей. Пакет разработан в университете BRGM, Франция. Стандартная версия UsimPac включает математические модели дробилок, стержневых и шаровых мельниц, флотационных камер и колонн, гидроциклонов, грохотов, спиралей, вибростолов, отсадочных машин, спиральных и речечных классификаторов, сгустителей, фильтров, чанов для выщелачивания, чанов для угля в пульпе, и др. UsimPac предоставляет три основных режима моделирования:

1. Прямое моделирование. Прогнозирует работу фабрики, основываясь на технологической схеме и характеристиках питания и оборудования (объема питания и качестве руды). Для нахождения наиболее оптимальной конфигурации схемы, режим позволит оперативно проверить множество конфигураций любых ее параметров.
2. Обратное моделирование. UsimPac также обладает возможностью рассчитывать различные конфигурационные параметры схемы, основываясь на экспериментальных и целевых данных. Например, пакет позволяет рассчитать и, при необходимости, оптимизировать размеры основного оборудования схемы, достаточные для достижения требуемой производительности фабрики.
3. Целевое моделирование. Для выполнения проекта два предыдущих режима часто последовательно используются различными способами. Последовательность шагов как правило требует множественных запусков математического моделирования для достижения заданной цели. UsimPac теперь содержит третий алгоритм (см. рисунок 4) Целевое моделирование (ODS – Objective driven simulation) (Brossaud et al., 1991), который расставляет шаги прямого и обратного моделирования в очередь. В рамках одного запуска, такой алгоритм позволяет спрогнозировать производительность всей схемы, откалибровать параметры моделей операций, рассчитать размеры и параметры оборудования.



Рисунок 4. Схема алгоритма Целевого моделирования

UsimPac также предлагает набор инструментов для упрощения анализа процессов и оценки параметров моделей операций:

**Согласование данных.** Экспериментальные измерения скоростей потоков, гранулометрических распределений или химических композиций на промышленных или пилотных фабриках всегда содержат массу ошибок. Как результат, такие данные противоречат закону сохранения массы, даже в случае, если фабрика работает в устоявшемся состоянии. UsimPac использует такие противоречивые измерения для расчета детального согласованного материального баланса. Такой баланс не только имеет очень важное значение в части оценки операций действующей фабрики, но и переводит экспериментальные данные в формат, который можно использовать для калибровки математических моделей.

**Калибровка математических моделей операций/аппаратов.** Эта функция автоматически рассчитывает калибровочные коэффициенты математических моделей операций, чтобы расчетные данные модели соответствовали экспериментальным.

**Расчет капитальных инвестиционных затрат.** UsimPac может использовать результаты прямого моделирования и другие сопутствующие данные для расчета примерных капитальных затрат на конфигурацию фабрики. Включая стоимость основных узлов оборудования и стоимость строительства, пуско-наладки фабрики на основе типовых соотношений. Пользователь может сам выбрать валюту и год. Финансовые данные могут быть легко приведены в соответствие с ситуацией в текущем году.

Разработанный для Windows, UsimPac предлагает очень удобный дружелюбный интерфейс, интуитивный для инженера-обогатителя. Технологическая схема, ядро любого проекта, предоставляет массу информации о каждом потоке и аппарате. С учетом многообразия подходов к проектированию и моделированию, принятых в различных направлениях моделирования технологических процессов, в разных странах, UsimPac является гибко конфигурируемым решением. Наименование иконок аппаратов и операций, а также параметры моделей могут быть легко модифицированы и адаптированы под конкретную специфику. Форматы и единицы измерения также могут быть адаптированы согласно привычек конкретных пользователей.

Модуль для разработчика для пакета UsimPac позволяет пользователю добавлять иконки и новые математические модели в существующие библиотеки иконок и моделей UsimPac.

## **VII. Специальные модели операций**

Как было сказано выше, в рамках проекта необходимо было разработать новую и адаптировать несколько существующих математических моделей операций.

### *Модель мельницы самоизмельчения*

Модель мельницы самоизмельчения, использованная LKAB для этого проекта, представляла из себя вариант модели мельницы самоизмельчения/полусамоизмельчения компании Control International, специально адаптированной для использования в интерфейсе UsimPac и для моделирования новой фабрики LKAB. Это феноменологическая модель баланса популяций (PBM) первого порядка, основные свойства которой описаны ниже.

Материал в мельнице условно разделяется на “Камни”, образующие измельчающую среду, и “Частицы”. Камни крупнее размера отверстия разгрузочной решетки, Частицы – мельче. Принимается, что Камни попадают в один класс крупности и выходят из мельницы только после дробления на Частицы. В стационарном (устоявшемся состоянии), скорость с которой Камни попадают в мельницу равна скорости их дробления:



$$M_R - K_R H_R = 0$$

Где  $M_R$  – скорость подачи Камней (т/ч),  $K_R$  – скорость дробления Камней ( $\text{ч}^{-1}$ ),  $H_R$  – масса Камней в мельнице (т).

Частицы (меньше размера разгрузочной решетки) разбиты на  $N$  классов крупности. Аккумуляция материала в каждом классе происходит вследствие дробления Камней и Частиц, а также перемещения Частиц внутри мельницы:

$$\frac{dH_p m_i}{dt} = M_F m_{Fi} - K_D H_p m_i + K_R H_R b_i - S_i H_p m_i + \sum_{j=1}^{i-1} b_{ij} H_p S_j m_j$$

где  $M_F$  – скорость подачи Частиц (т/ч),  $m_{Fi}$  – пропорция Частиц класса крупности  $i$  в питании,  $K_D$  – скорость разгрузки мельницы ( $\text{ч}^{-1}$ ),  $H_p$  – масса Частиц в мельнице (т),  $m_i$  – пропорция Частиц класса крупности  $i$  в мельнице,  $b_i$  – распределение Камней после дробления,  $S_i$  – скорость дробления Частиц класса крупности  $i$  ( $\text{ч}^{-1}$ ) и  $b_{ij}$  – распределение Частиц после дробления. В устоявшемся состоянии  $\frac{dH_p m_i}{dt} = 0$ .

Зависимость констант скорости от условий мельницы представлены следующими уравнениями:

$$K_R = \frac{K_R^E P}{H_R}, K_D = \frac{K_D^E P}{H_p}, S_i = \frac{S_i^E P}{H_p}$$

где  $P$  – мощность мельницы (кВт),  $K_R^E$  – удельная скорость дробления Камней ( $\frac{\text{т}}{\text{кВтч}}$ ),  $K_D^E$  – удельная скорость разгрузки мельницы ( $\frac{\text{т}}{\text{кВтч}}$ ) и  $S_i^E$  – удельная скорость дробления Частиц класс крупности  $i$  ( $\frac{\text{т}}{\text{кВтч}}$ ).

Мощность мельницы  $P$  и масса твердого в мельнице связаны уравнением мощности:

$$P = K_p \sin \alpha D^{0,3} (H_i + H_w) (3.2 - 3V^*) N^* (1 - \frac{0.1}{2^{9-10N^*}})$$

где  $K_p$  – константа мощности,  $H_t = H_p + H_R$ ,  $H_w$  – вес воды в мельнице (т),  $D$  – внутренний диаметр мельницы (м),  $V^*$  – объем загрузки мельницы (твердым) (%),  $N^*$  – скорость мельницы (фракция критической скорости) и  $\alpha$  – угол естественного откоса загрузки (радиан),  $\alpha = K_{A1} e^{(K_{A2} N^* + K_{A3} MFS)}$ , где  $K_{A1}, K_{A2}, K_{A3}$  – параметры и  $MFS$  – масса Частиц в мельнице. Поскольку  $MFS$  не известна, предполагается, что она пропорциональна проценту твердого в питании (твердое + жидкое).

Модель баланса популяций по существу рассчитывает общее гранулометрическое распределение разгрузки. Тем не менее, модель должна также прогнозировать содержание магнетита в каждом классе крупности, чтобы позволять операционное моделирование всей схемы в UsimPac. Поэтому модель начинается с параметров  $t_{ij}$ , которые представляют собой средние значения для пропорции минерала  $j$  в классе  $i$ . Минерал  $j$  это или магнетит или пустая порода.

Пропорция Частиц типа  $j$  в классе  $i$  в конечном итоге прогнозируется следующим образом:

$$\theta_{ij} = \frac{t_{ij}T_j}{\sum_{i=1}^N x_i t_{ij}}$$

где  $T_j$  – общая пропорция Частиц типа  $j$  в питании мельницы,  $x_i$  – пропорция класса  $i$  в разгрузке мельницы, спрогнозированная с помощью модели баланса популяций первого порядка и  $t_{ij}$  – параметры модели, определенные выше.

Кроме того, предполагается, что барабанное сито, прикрепленное к мельнице, имеет идеальное отсечение. Вода разделяется в соответствии с параметрами модели, которые определяют содержание твердого в потоке крупного.

#### *Модель галечной мельницы*

Модель галечной мельницы, разработанная для LKAB также является феноменологической моделью баланса популяций первого порядка и, в значительной степени, адаптацией основной модели шаровой мельницы.

Материал в галечной мельнице состоит из галечной измельчающей среды и частиц руды, подвергаемых измельчению. Галька подвергается истиранию, скалыванию и даже дроблению. Тем не менее, считается что основным феноменом является именно истирание. Базовое уравнение для истирания выглядит следующим образом:

$$\frac{dH_B(t)}{dt} = -8 \frac{K_B H_B(t)}{D_{max}}$$

где  $H_B(t)$  – масса гальки в мельниц в момент времени  $t$  (т),  $K_B$  – скорость износа гальки ( $\frac{см}{ч}$ ) и  $D_{max}$  – максимальный размер гальки (см).

Процесс уменьшения размера для частиц описывается типовой моделью баланса популяций для измельчения, базовое уравнение которой выглядит следующим образом:

$$\frac{dm_i(t)}{dt} = -S_i^E \frac{P}{H} m_i(t) + \sum_{i=1}^{j-1} b_{ij} S_i^E \frac{P}{H} m_j(t)$$

где  $m_i(t)$  – масса класс крупности  $i$  в момент времени  $t$ ,  $P$  – мощность, подаваемая на мельницу (кВт),  $H$  – масса измельченного материала (т),  $S_i^E$  – дискретизированная по размеру функция отбора и  $b_{ij}$  – дискретизированная по размеру функция дробления.  $b_{ij}$  и  $S_i^E$  представлены функциями, похожими на те, что использовались в модели шаровой мельницы:

$$S_i^E = S_1^E e^{(\vartheta_1 \ln \frac{\sqrt{d_i d_{i+1}}}{\sqrt{d_1 d_2}} + \vartheta_2 \left( \ln \frac{\sqrt{d_i d_{i+1}}}{\sqrt{d_1 d_2}} \right)^2)}$$

$$b_{ij} = \alpha_1 \left( \frac{d_i}{d_{j+1}} \right)^{\alpha_2} + (1 - \alpha_1) \left( \frac{d_i}{d_{j+1}} \right)^{\alpha_3}$$

где  $d_i$  – максимальный размер для класса крупности  $i$ .

Фактические уравнения запрограммированной модели являются соответствующими уравнениями для продолжающегося процесса, с предположением, что время пребывания частиц в мельнице корректно описывается моделью “серии из N смесителей”.

Расчет энергопотребления (P) адаптирован к модели, описываемой Rowland and Kjos (1978). Вопреки происходящему в шаровой мельнице, увязать мощность только с загрузкой измельчающей среды не представляется возможным:

$$P = 10F \frac{\pi}{4} \sin \alpha D^{2.3} L \rho_c V^* (3.2 - 3V^*) N^* \left(1 - \frac{0.1}{2^{9-10N^*}}\right)$$

где  $F$  – фактор разгрузочной решетки, как правило 1.1,  $\rho_c$  – средняя плотность загрузки, включая гальку, руду и воду,  $D$  – внутренний диаметр мельницы (м),  $L$  – длина мельницы (м),  $V^*$  – объем, заполненный твердым и галькой (%),  $N^*$  – скорость мельницы (фракция критической скорости) и  $\alpha$  – угол естественного откоса загрузки (радиан).

На практике угол естественного откоса варьируется в зависимости от типа гальки и футеровки, и не измеряется напрямую. Он используется в качестве калибровочного коэффициента для корректировки модели в соответствии с экспериментальными значениями  $P$ .

### *Другие модели операций*

Для низкоинтенсивного магнитного сепаратора для мокрого обогащения была разработана статистическая модель. Она была выведена из статистического анализа действующей фабрики LKAB. В целом, модель предполагает, что содержание и извлечение магнетита на класс крупности концентрата не подвергается влиянию со стороны незначительных изменений содержания магнетита в питании, в скорости подачи питания, в гранулометрическом распределении питания.

Дробилки, грохоты, гидроциклоны были смоделированы с помощью существующих моделей UsimPac, которые оказались полностью подходящими LKAB и не требовали дополнительной разработки.

## **VIII. Оценка параметров модели**

Уравнения моделей операций отражают сущность физики соответствующих процессов. Тем не менее, они не могут в полной мере учесть всю сложность операций по обогащению полезных ископаемых (сложность в значительной степени обеспечивается физическими и минералогическими характеристиками руды). Поэтому модель может корректно прогнозировать процесс, только если некоторые коэффициенты уравнений (параметры модели) оценены на основе экспериментальных данных.

В случае, когда конечной целью является моделирование изменений и оптимизация действующего производства, в качестве экспериментальных данных идут операционные параметры действующей фабрики. Однако, в описываемом проекте, такой фабрики еще не существовало. Поэтому параметры моделей были получены из различных источников:

- Предыдущий опыт LKAB;
- Предварительные оценки характеристик будущей руды;
- Пилотные эксперименты, проводимые LKAB;
- Эксперименты, проведенные на действующей фабрике в Kiruna;
- Специальные лабораторные испытания.

### *Параметры модели мельницы самоизмельчения*

Параметры модели мельницы самоизмельчения были выведены LKAB из опытной эксплуатации крупномасштабной пилотной фабрики (размер пилотной мельницы: 4.6м x 3.2м, типовая скорость подачи питания: около 200 т/ч). Хотя схема для пилотных испытаний отличалась от схемы конечного варианта схемы будущей фабрики, предполагалось, что масштаб эксперимента

позволял корректную калибровку модели. Несколько наборов данных было собрано в рамках различных испытаний. Эти данные были согласованы с использованием статистической модели UsimPac а затем использованы с помощью специального ПО компании Control International для оценки параметров.

#### *Параметры модели галечной мельницы*

LKAB провела несколько испытаний для проверки пригодности измельчения магнетитовой рудной галькой. Также был проведен один крупномасштабный тест на одной из действующих галечных мельниц (галька из пустой породы) в Kiruna. Несколько других испытаний были проведены в пилотных масштабах. Основными проблемами были выбор наилучшего типа гальки (материал и интервал размеров, которые смогли бы обеспечить наилучшую производительность измельчения) и оценка скорости износа выбранной гальки (как следствие – расчет будущего потребления гальки).

Элемент	Переменные на входе	Расчетный выход
Технологическая схема	Любая технологическая схема	
Материал питания завода и скорость подачи питания	Содержание магнетита, гранулометрическое распределение, расход твердого, процент твердого	
Мельница самоизмельчения	Диаметр, длина, скорость вращения, отверстия решетки, добавление воды	<b>Для всех потоков:</b> расход твердого, процент твердого, гранулометрическое распределение, содержание магнетита
Галечная мельница	Диаметр, длина, скорость вращения, наполнение галькой, отверстия решетки, качество руды B, D, Primary, характеристики гальки, добавление воды	<b>Для измельчения в мельницах самоизмельчения:</b> потребление энергии, загрузка мельницы, процент наполнения
Галька	Размер гальки, удельная плотность, содержание магнетита, скорость износа, гранулометрическое распределение мелкого продукта	<b>Для измельчения в галечных мельницах:</b> Энергопотребление, скорость добавления гальки
Магнитный сепаратор	Содержание магнетита в концентрате, извлечение магнетита в концентрат	
Грохоты	Поверхность грохочения, размер ячеек сита или кривая разделения	
Гидроциклоны	Диаметр, высота, размеры питающей, песковой и сливной насадок или кривая разделения	
Дробилка	Гранулометрическое распределение продукта	

Таблица 1. Входные параметры и расчетный выход для математической модели новой фабрики LKAB-Kiruna

Компанией Control International была проведена серия лабораторных опытов. Для проведения серии опытов с различными гранулометрическими распределениями магнетитовой рудной гальки и различными типами руды (крепость руды и содержание фосфора) была использована лабораторная мельница. Затем, по специальной методике, на основании результатов таких тестов был рассчитан ряд параметров:

- Функция дробления, соответствующая каждому типу руды;
- Функции отбора, соответствующие каждому типу руды, размеру гальки и проценту твердого;
- Скорость износа гальки.

## **IX. Заключение**

По итогам анализа существующих данных, адаптации существующих и разработки новых математических моделей операций, лабораторных опытов по измельчению и калибровки используемых математических моделей, комплексная математическая модель (симулятор) фабрики была готова к использованию. Таблица 1 показывает входные параметры, используемые моделью, а также множество расчетных параметров, которая она выдает.

Комплексная модель интенсивно использовалась командой ЛКАВ для проверки различных гипотез при проектировании новой фабрики:

- Сравнение схем с одной и двумя линиями;
- Каково будет потребление гальки, будет ли достаточно гальки, произведенной циклом самоизмельчения;
- Что произойдет, если убрать дробилку, какой объем сырья необходимо будет раздробить;
- Как поведет себя баланс схемы, если изменить размер отверстия разгрузочной решетки мельницы самоизмельчения;
- Сколько необходимо гидроциклонов;
- Необходимы ли грохоты;
- Что произойдет в случае увеличения скорости подачи питания и содержания полезного компонента в питании;
- Каково должно быть качество концентрата для руд с высоким и низким содержанием фосфора;
- И др.

Ожидается, что комплексная модель будет интенсивно использоваться в дальнейшем после запуска новой фабрики для лучшего понимания и оптимизации процессов.

Комплексная математическая модель (симулятор) совмещает возможности пакета для продвинутого моделирования процессов UsimPac, специально отобранных и адаптированных математических моделей операций, экспериментальных данных, полученных в результате пилотных и лабораторных испытаний, экспертизы в моделировании и анализе процессов мультидисциплинарной команды, включающей как инженеров производителей, так и специалистов по математическому моделированию процессов.

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](mailto:sales@procsim.ru)