

Проектирование и оптимизация цикла тяжелосредной сепарации с использованием моделирования и симуляции процессов

S. Brochot^a, J. Bosman^b, M.-A. de Ville d'Avray^a

^aCASPEO, SARL, ул. Авеню Клода Гиймен, 3, г. Орлеан, Франция

^bPESCO, Хеннопспарк X16, Центурион, Южная Африка

АННОТАЦИЯ

Технологии тяжелосредной сепарации (ТСС) используются для концентрации легких (уголь, литий) или тяжелых (хромит, железная руда, алмазы) минералов, а также для предварительной концентрации руд (свинец/цинк) или отходов (пластики). Тяжелая среда формируется в основном из суспензии магнетита или ферросилиция в воде.

Проектирование и оптимизация цикла ТСС требуют наличия полного и подробного материального баланса, который может быть посчитан с помощью инструментов моделирования и симуляции. Такой баланс не ограничивается только рудой и ценными минералами в ней, но также включает извлечение и самой тяжелой среды. Хотя плотность является основным свойством, важным для сепарации, размеры частиц и, в частности, классы раскрытия, которые возможно ассоциировать с кривой обогатимости, также играют существенную роль.

Настоящая статья показывает, как платформа для моделирования и симуляции USIM PAC позволит справиться с этой задачей с помощью набора моделей узлов ТСС, таких, как барабаны и циклоны, а также связанных с ними узлов грохочения (обезвоживание, отмывка) и магнитной сепарации для извлечения среды. Для иллюстрации подхода приведены несколько примеров концентрации минералов.

ВВЕДЕНИЕ

Производительность заданного цикла тяжелосредной сепарации (ТСС) определяется различными параметрами, такими, как гранулометрическое распределение и распределение плотности в различных потоках, а также кривыми обогатимости и/или разделения (Bosman, 2014). Основной задачей математической модели является воспроизведение такой производительности путем симуляции, которая предоставила бы удовлетворительное соответствие наблюдаемым данным. Такое воспроизведение является очень важным для улучшения понимания процесса. Другим преимуществом математической модели является возможность прогнозирования поведения схемы при изменении некоторых параметров, например, при изменениях в самой схеме, в размерах или настройках основного оборудования, в свойствах перерабатываемых материалов. Симуляция затем может быть использована для проектирования и оптимизации отдельно цикла ТСС или фабрики в целом.

Математическая модель воспроизводит действительность с помощью математических уравнений, выводимых из общих знаний по наблюдаемому феномену. Такие уравнения могут быть классифицированы по трем типам: (i) уравнения, выведенные из общих физических теорий (например, уравнение Ньютона) с использованием констант и параметров, доступных в справочниках, или измеряемых напрямую; (ii) уравнения, выведенные из общих физических теорий, но включающие параметры подгонки модели, не измеряемые напрямую; (iii) эмпирические уравнения, выведенные из экспериментальных исследований и использующие

поправочные коэффициенты. Параметры типов (ii) и (iii) компенсируют недостаток знаний, возникающий в форме пробелов между общей теорией и наблюдениями. Поэтому математическая модель является только аппроксимацией действительности, ограниченной знанием.

При подготовке модели могут быть использованы различные теории с различным уровнем описания. Выбор теории определяется: (i) ее способностью воспроизведения наблюдений, т.е. подгонки существующего набора данных; (ii) ее наблюдаемостью, т.е. взаимно-однозначным соответствием между наблюдениями и поправочными коэффициентами; (iii) ее адекватностью относительно целей использования модели.

Часто используемой моделью непрерывных процессов является графическое представление материальных потоков (схема узлов основного оборудования и материальных потоков фабрики). Каждый поток характеризуется набором данных, описывающих материал, проходящий на этой стадии (количество, гранулометрическое распределение и распределение плотности, химический состав, и др.). Каждый узел оборудования характеризуется моделью соответствующей операции, которая группирует набор уравнений, связывающих данные входящих и выходящих потоков с другими параметрами (размеры и настройки оборудования, поправочные коэффициенты, и др.)

На такой модельной структуре основывается программный пакет USIM PAC (Brochot et al, 2006, 2010, Gonzalez et al., 2017). Это удобный в использовании симулятор устоявшегося состояния, который позволяет инженерам технологом и обогатителям, а также научным специалистам, моделировать операции обогатительных фабрик с имеющимися экспериментальными данными, и определять оптимальную конфигурацию параметров основного оборудования, позволяющую достичь поставленных целей. Симулятор также поможет инженерам проектировщикам с расчетом размеров основного оборудования, требуемого для достижения целевых показателей.

Следующий раздел описывает доступные в USIM PAC модели ТСС. Отдельно описана недавно добавленная модель барабанной тяжелосредной сепарации. Далее приводится описание материала, т.н. «фазовой модели», и ее связей с моделями операций. Последний раздел представляет расчетный пример и обсуждение взаимосвязей между выбором моделей и задачами симуляции.

МОДЕЛИРОВАНИЕ ОПЕРАЦИЙ ЦИКЛА ТСС

Типовой цикл ТСС характеризуется центральным узлом, использующим тяжелую среду для осуществления сепарации, а также циклом извлечения такой тяжелой среды (см. рисунок 1). Операции цикла ТСС таким образом могут быть разделены на те, что непосредственно осуществляют сепарацию частиц по плотности, и те, что перерабатывают тяжелую среду.

Тяжелая среда как правило формируется как смесь тяжелых мелких частиц и воды (Bosman, 2014). Использование магнитных тяжелых частиц, таких, как магнетит или ферросилиций, способствует их извлечению и концентрации с использованием аппаратов магнитной сепарации. Дополнительно к такой твердой фазе (тяжелые частицы) и жидкой фазе (вода), математические модели и инструменты симуляции должны учитывать другую твердую фазу, соответствующую перерабатываемой руде (или другого типа материала, например, техногенных отходов).

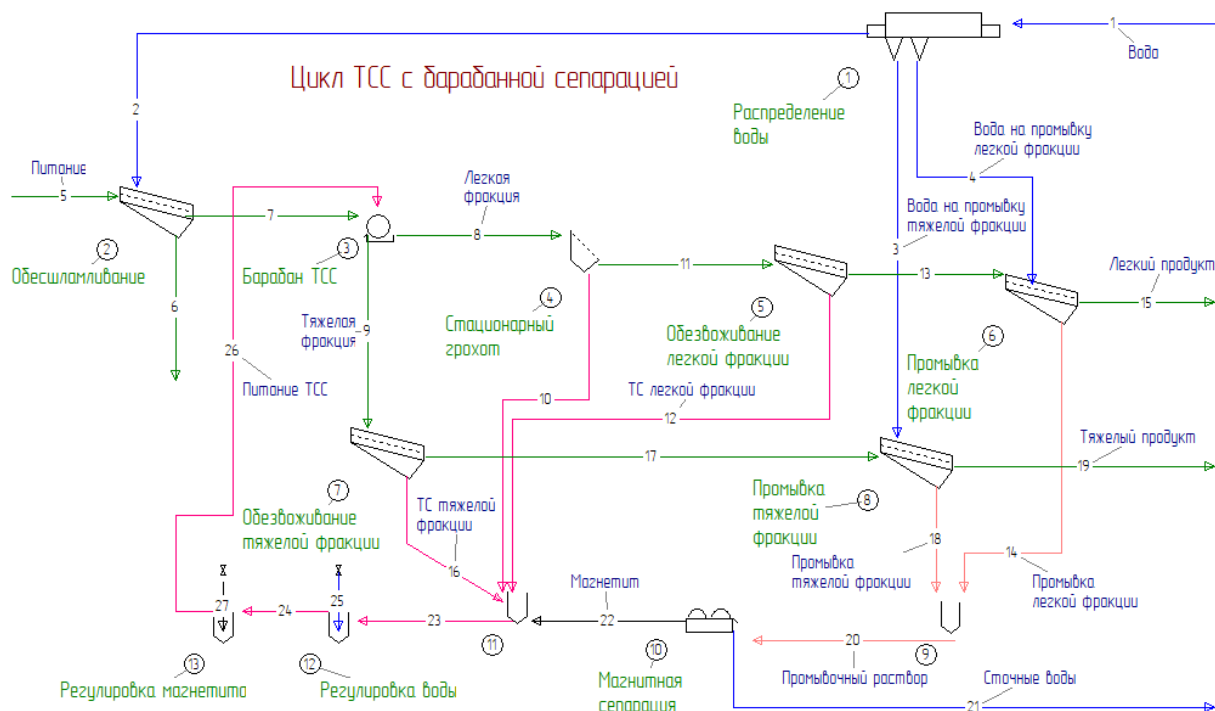


Рисунок 1. Пример типового цикла ТСС с барабанным сепаратором и циклом извлечения тяжелой среды.

Операции цикла ТСС

Два типовых узла, осуществляющих такую сепарацию, это тяжелосредный барабан (ТСБ), статический сепаратор, и тяжелосредный циклон (ТСЦ), динамический сепаратор. Первый отлично подходит для переработки крупных частиц (до 300 мм), в то время как второй больше адаптирован для средних размеров (0,5 – 100 мм). В обоих случаях необходимо обесшламливание, чтобы не допустить загрязнения среды. Мелочь может быть переработана другими гравитационными методами, например, в отсадочных машинах или на спиралях.

Библиотека математических моделей USIM PAC включает модели производительности (классифицируемые, как модели 0го уровня), которые позволяют напрямую указать целевое извлечение рудных частиц в потоки легкой и тяжелой фракций, а также разделение тяжелой среды. Другая модель уровня 0 основана на кривых разделения по плотности Тромпа. Такие модели могут быть использованы в рамках процедуры проектирования фабрики для расчета предварительного материального баланса, до расчета размеров основного оборудования. Для увеличения прогностичности симуляции и обеспечения возможности расчета размеров оборудования требуются более продвинутые модели (классифицируемые, как модели 1го уровня). Следующий раздел описывает такую модель для ТСБ. Касательно ТСЦ, может быть использована модифицированная модель Плитта (Plitt), учитывающая плотность не только рудных частиц, но и среды, а также ее вязкость.

Переработка тяжелой среды

Переработка тяжелой среды включает в себя регулировку ее плотности, ее отделение от руды и регенерацию.

Регулировка плотности среды осуществляется путем добавления частиц среды для увеличения ее плотности, или разбавления среды водой для снижения, или и то и другое. Библиотеки USIM PAC включают соответствующую модель, которая позволяет управлять множеством регулируемых и регулирующих фаз, которые могут различаться.

Извлечение тяжелой среды осуществляется как правило путем обезвоживания на грохоте. Оно выполняется в два этапа: (i) простое обезвоживание для извлечения максимума тяжелой среды с ее исходной плотностью, (ii) промывка путем добавления воды для удаления тяжелой среды, которая была увлечена рудой. Поскольку оба этапа осуществляются на грохотах, для симуляции этих процессов в USIM PAC представлены несколько моделей: модели производительности (уровня 0), основанные на эффективности грохочения, или размерные модели (уровня 1), более прогностические и используемые для расчета необходимых размеров оборудования.

Плотность тяжелой среды, извлеченной на первом из указанных выше этапов, может быть незначительно ниже требуемой. В этом случае возможно добавить циклон стуститель и использовать модель Плитта для его моделирования. Тяжелая среда, извлеченная на втором этапе, была разбавлена промывочной водой, что существенно снизило ее плотность. Тяжелые частицы могут быть извлечены магнитной сепарацией и направлены в зумпф подготовки тяжелой среды. Поскольку такая сепарация является достаточно простой, для этой операции возможно использовать модель производительности (уровня 0) низкоинтенсивной магнитной сепарации (LIMS), реализованную в USIM PAC.

Одно из преимуществ моделирования сквозной цепочки цикла ТСС заключается в возможности оперативной оценки потерь тяжелой среды и потребления свежей. Появляется возможность смоделировать различные конфигурации, чтобы выбрать наиболее выгодный вариант.

МОДЕЛИРОВАНИЕ БАРАБАННОЙ ТСС

Багули и Нейпер-Манн (Napier-Munn, 1991) предложили математическую модель ТСБ. Эта модель основывается на корреляции между производительностью разделения частиц и их критической скоростью осаждения в ванной. Такая критическая скорость рассчитывается для каждого класса крупности и класса плотности. Уравнение 1 задает кривую разделения как функцию критической скорости:

$$P_{ij} = \left[1 - (v_{100} - v_{tij})^2 \right]^{\left(\frac{A}{d_i^2 + B} \right)} \quad (1)$$

Где P_{ij} это доля частиц в классе крупности i и классе плотности j попадающая в тяжелую фракцию, v_{tij} это критическая скорость таких частиц, а d_i – их размер. A , B и V_{100} это поправочные коэффициенты, которые могут быть оценены на основе данных производительности.

Недостатком такого подхода является большое число поправочных коэффициентов, один из которых зависит от расхода питания. В то же время количество питания является одним из показателей, для которого мы хотели бы прогнозировать влияние на эффективность сепарации. Кроме этого, поскольку такая модель не рассматривает размеры оборудования, ее невозможно будет использовать для расчета таких размеров.

Целью реализации модели, предлагаемой в настоящей статье, является обеспечение большей прогностичности за счет связывания критической скорости с размерными и рабочими

характеристиками оборудования. Модель также рассчитывает долю частиц P_{ij} в классе крупности i и классе плотности j , попадающую в тяжелую фракцию, с помощью функции, схожей с функцией Уитена (Whiten):

$$P_{ij} = \frac{1}{1 + e^{\frac{T_{ij} - \tau}{E_p}}} \quad (2)$$

где:

τ среднее время нахождения пульпы в барабане, посчитанное по расходу питания и геометрии барабана,

E_p несовершенство разделения, которое подлежит поправке,

T_{ij} время, теоретически необходимое для одной частицы из класса крупности i и класса плотности j чтобы перейти в тяжелую фракцию, рассчитывается с помощью уравнения (3).

Частица, время осаждения которой совпадает с временем нахождения, обладает вероятностью 50% перехода в тяжелую фракцию. Частицы, плотность которых ниже плотности среды, всплывают и систематически попадают в легкую фракцию.

$$T_{ij} = \frac{H}{v_{tij}} \quad (3)$$

где:

H средняя высота жидкости в барабане,

v_{tij} критическая скорость осаждения частиц класса крупности i и класса плотности j , полученная путем балансировки подъемных сил и сил сопротивления, как задано в уравнении (4) для сферических частиц:

$$V_i \frac{(\rho_j - \rho_m)}{\rho_m} g = \frac{1}{2} C_{Dij} v_{tij}^2 A_i \quad (4)$$

где:

V_i объем частиц,

ρ_j плотность частиц,

ρ_m плотность тяжелой среды,

g ускорение свободного падения,

C_{Dij} коэффициент сопротивления частиц,

A_i площадь проекции поверхности частиц.

Поскольку частицы, перерабатываемые в большинстве отраслей промышленности, редко обладают идеальной сферической формой, форма частиц учитывается с применением объемного коэффициента формы Хейвуда (Brown and Heywood, 1991), определяемого следующим образом:

$$K_i = \frac{V_i}{d_a^3} \quad (5)$$

где d_a это диаметр окружности с той же площадью проекции поверхности, что и частица:

$$A_i = \frac{\pi d_a^2}{4} \quad (6)$$

Подставляя уравнения (5) и (6) в уравнение (4), и принимая $d_a \approx d_i$, получаем следующее уравнение для критической скорости осаждения несферических частиц:

$$v_{tij}^2 = \frac{8K_i d_i g (\rho_j - \rho_m)}{C_{Dij} \pi \rho_m} \quad (7)$$

Коэффициент сопротивления определяется с использованием формулы Тертона и Левеншпиля (Turton and Levenspiel, 1986) [2]:

$$C_{Dij} = \frac{24}{Re_{ij}} (1 + 0.173 \cdot Re_{ij}^{0.657}) + \frac{0.413}{1 + 16300 \cdot Re_{ij}^{-1.09}} \quad (8)$$

где Re_{ij} это число Рейнольдса, задаваемое для сферических частиц по формуле:

$$Re_{ij} = \frac{\rho_m v_{tij} d_i}{\mu_m} \quad (9)$$

где μ_m это вязкость частиц. Коэффициент сопротивления, число Рейнольдса и критическая скорость рассчитываются итеративно до сходимости.

Разделение фаз среды регулируется процентом твердого в тяжелой фракции с предположением, что соотношение твердого/жидкого тяжелой среды является постоянным (частицы среды следуют жидкого).

МОДЕЛИРОВАНИЕ ФАЗЫ

Фазовая модель USIM PAC описывает набор данных, используемых для характеристики материала, перерабатываемого в цикле (Brochot et al. 1995, 2002). Она основывается на свойствах материала (размеры частиц, плотность частиц, содержание элемента, и др.), называемых «критериями», и на способе последовательной классификации материала с использованием таких критериев (гранулометрическое распределение, распределение по плотности, содержание по классу крупности, минералогический состав, классы раскрытия, и др.).

Гранулометрическое распределение

Хотя в циклах ТСС для классификации частиц используется свойство плотности, заметную роль играет и гранулометрическое распределение. Это свойство материала легко определяется различными способами, дающими различное распределение частиц по размеру. Выбор способа измерения должен соответствовать определению гранулометрического распределения, используемому в теоретической основе модели операции (например, если классификация основывается на силе сопротивления, лучше использовать метод осаждения).

Для большинства циклов ДСС, рудная фаза должна характеризоваться гранулометрическим распределением. Твердое, составляющее тяжелую среду, может быть описано одним классом

крупности, который будет использоваться в основном на этапах просеивания и промывки, для сущения и магнитной сепарации.

Распределение по плотности

Распределение по плотности является ключевым свойством для циклов ТСС. USIM PAC позволяет определять различные классы плотности для описания материала с помощью распределения плотности по классам крупности. Такое подробное описание материала повысит прогностичность модели цикла ТСС: обеспечит лучшую оценку производительности сепарации (оценку гранулометрического распределения и состава). Плотность частиц зависит от составляющих ее минералов. Поэтому, как показано ниже, распределение по плотности связано с минералогическим составом и раскрытием минералов.

Химический и минералогический состав по классам крупности

Химический состав определяется в лаборатории путем химического анализа. При этом моделирование процессов как правило отталкивается от минералов. Химический состав используется для металлургического учета и может быть сконвертирован в минералогический состав, когда такая конвертация возможна. Хотя это не так в нашем случае, для решения проблемы можно сделать некоторые предположения.

Стадии ТСС перерабатывают минералы, не химические элементы. Классификация по плотности или магнитная сепарация также исходят от минералов. Кроме этого, один и тот же химический элемент может появляться в разных формах (минералах) с очень разным поведением в рамках процесса. Например, в случае железной руды, элемент Fe может появляться в тяжелых минералах, таких, как гематит, которые в основном переходят в тяжелую фракцию, или в глине, которая как правило переходит в легкую фракцию или удаляется при обесшламливания; или в магнетите или ферросилиции, которые увлекаются рудой из тяжелой среды. Только подробное описание свойств материала по каждому классу крупности позволяет спрогнозировать поведение ценных металлов/компонентов в цикле ТСС. В нашем случае, для определения магнетита и других минералов железа, требуется измерение железа магнитного. Также, в силу влияния крупности частиц на стадии ТСС, необходим минералогический состав по каждому классу крупности.

Данные раскрытия минералов

Первое предложение из предыдущего абзаца возможно уточнить следующим образом, «Стадии ТСС перерабатывают частицы, но не минералы или химические элементы». Частицы как правило являются смесью различных минералов. Минералогический состав частиц может быть измерен путем анализа изображений. Измерение распределения по плотности может быть использовано, когда присутствуют только два минерала с очень разным удельным весом, как, например, ассоциация угля с золой.

Сложные частицы могут быть классифицированы на типы частиц в соответствии с их минералогическим составом. В случае наличия только двух фаз (например, ценный минерал и пустая порода; уголь и зола) типы частиц определяются диапазоном содержания первой фазы или средним содержанием. Для n фаз, число таких определяемых типов увеличивается до n -факториал ($n!$). Поэтому при наличии более трех фаз необходимо использовать другую классификацию.

Из-за раскрытия минералов, распределение типов частиц (доли частиц в каждом типе) очень сильно зависит от крупности частиц. Более крупные частицы относятся в основном к тем типам частиц, которые близки к усредненному минералогическому составу твердой породы. Мелкие частицы относятся в основном к типам, состоящим из раскрытых частиц (с фазовым содержанием 100% или 0%). Переход между этими двумя крайними распределениями происходит вблизи к крупности раскрытия. Плотность типов частиц определяется из их минералогического состава и плотностей соответствующих минералов.

В USIM PAC такие типы частиц могут быть определены с их минералогическим и химическим составами при задании фазовой модели. Заданная в схеме фазовая модель автоматически применяется для каждого потока, что дает возможность расчета минералогического и химического составов по каждому классу крупности и в целом, и так для каждого потока схемы.

СИМУЛЯЦИЯ ЦИКЛА ТСС

Схема, показанная на рисунке 1, была смоделирована, с помощью построенной модели затем была проведена симуляция. Фазовая модель состояла из трех фаз:

- Фаза «Уголь», характеризуемая гранулометрическим распределением (9 классов крупности), двумя компонентами (Уголь и Зола), и шестью классами плотности с типовым составом в части Угля и Зола.
- Фаза «Магнетит», характеризуемая одним классом крупности, задающим максимальный размер тяжелых частиц, и удельным весом в 4,85.
- Фаза «Вода», с удельным весом в 1, используемая в качестве технической воды и жидкого для тяжелой среды.

Как показано на рисунке 2, в дополнение к общему гранулометрическому распределению, поток питания характеризуется также распределением частиц по различным классам плотности в каждом классе крупности.

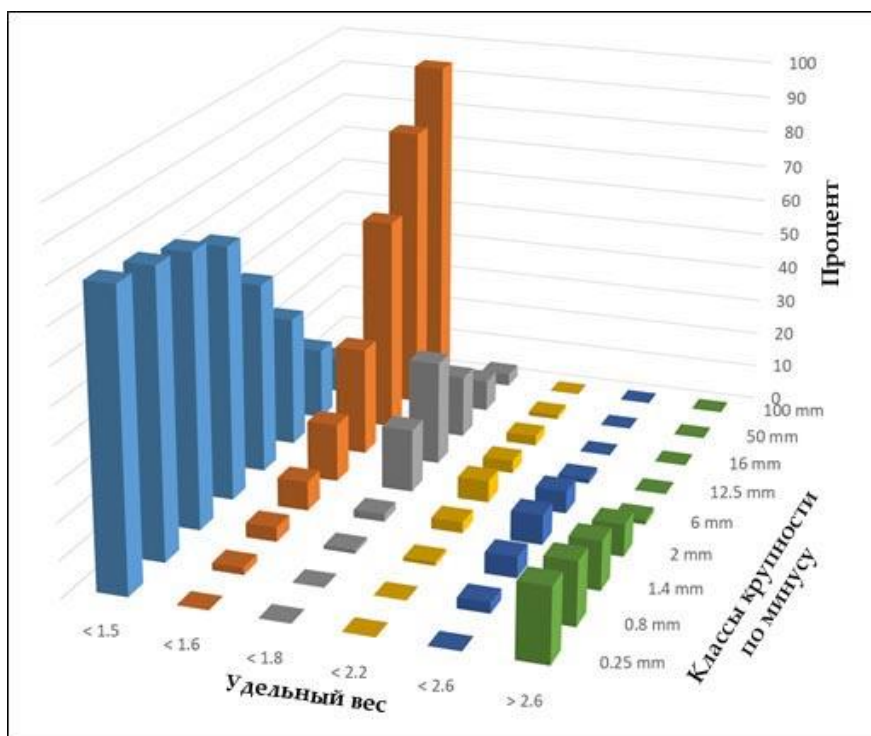


Рисунок 2. Состав каждого класса крупности питания в части классов плотности.

Все 54 класса крупности-плотности будут учтены математической моделью ТСБ для расчета критической скорости осаждения соответствующих частиц, которая зависит от их размера и плотности, и определения доли частиц, перешедших в тяжелую фракцию. Рисунок 3 показывает схожее распределение для легкого и тяжелого продуктов, явно демонстрируя разделение легких частиц угля и тяжелых частиц золы, а также некоторые несоответствия в силу несовершенства процесса и медленного осаждения мелких частиц.

Поскольку питание классифицировалось на 1мм для удаления мелочи, грохоты обезвоживания и промывки обладают отверстиями в 0,8мм, а стационарный грохот - 0,5мм, что позволяет отделить большую часть тяжелой среды (воды и магнетита) от руды. Модели производительности этих операций позволили симитировать увлечение части магнетита с надрешетным продуктом независимо от разделения воды. Это один из способов оценки потерь магнетита с продуктами. Схожим образом, для переработки подрешетного продукта промывки на узле магнитной сепарации модель позволила оценить потери магнетита со сточными водами.

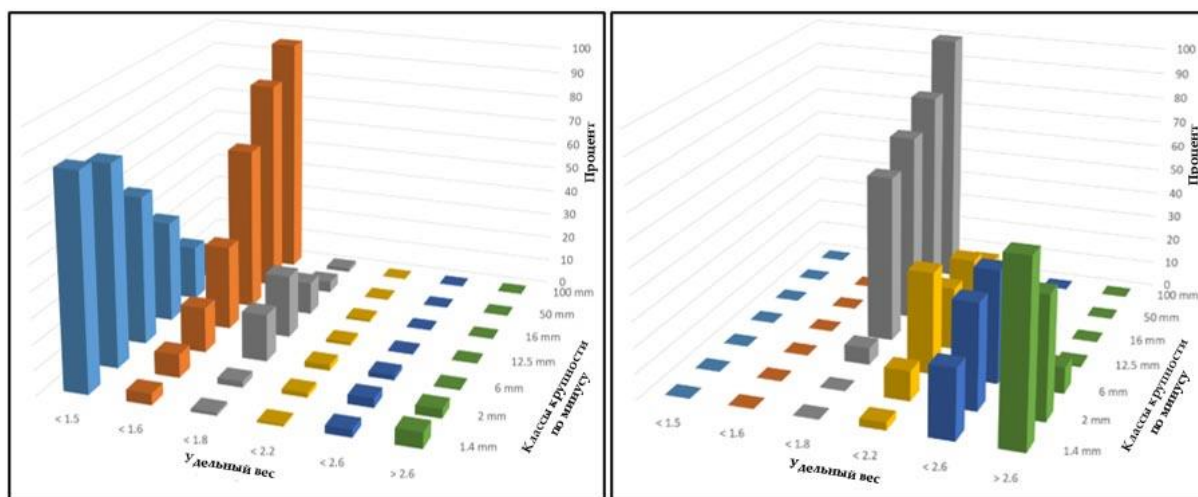


Рисунок 3. Распределение крупности-плотности легкого продукта (слева) и тяжелого продукта (справа).

Рисунок 4 показывает баланс масс магнетита. Потери сосредоточены в легком и тяжелом продуктах (потоки №15 и №19), а также в сточных водах магнитной сепарации (поток №21). Они компенсируются путем добавления нового магнетита в потоке №27. Эти значения слишком малы, чтобы быть видимыми, поскольку такое добавление представляет лишь 0,11% циркуляционной нагрузки магнетита.

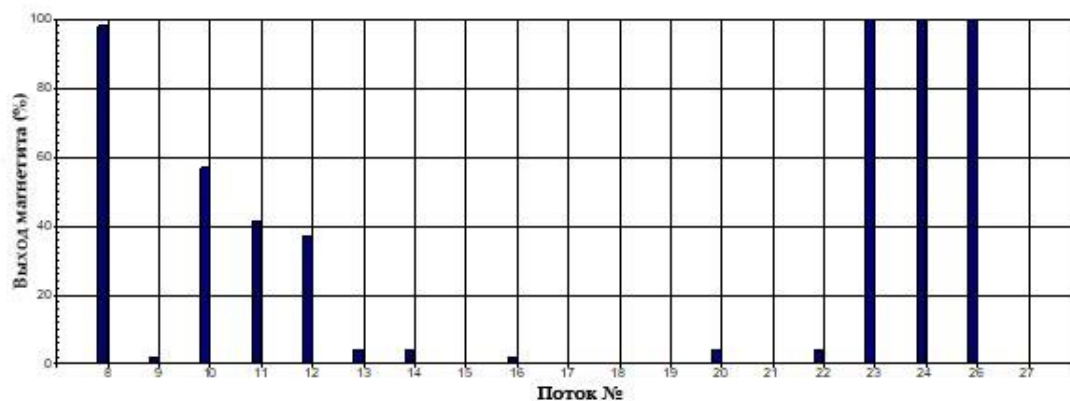


Рисунок 4. Выход магнетита относительно питания ТСС (поток №26).

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Различные уровни моделирования операций цикла ТСС а также преимущества применения каждого относительно задач моделирования были показаны на примере. USIM PAC дает такую гибкость при моделировании и симуляции. Основными преимуществами являются: (i) возможность принятия во внимание классов крупности и классов плотности не только отдельно, но и как распределения классов плотности по классам крупности; (ii) представление тяжелой среды как смеси жидкой фазы (воды) и твердой фазы (магнетита) с средней плотностью, при этом с возможностью рассмотрения магнетита как частиц, которые могут быть извлечены грохочением (с учетом его гранулометрического распределения) и магнитной сепарацией (с учетом его состава); (iii) возможность смоделировать в рамках одного окна сквозную схему обогащения и подробно описать рудную фазу в части гранулометрического распределения, распределения плотности по классам крупности, минералогического состава по каждому классу плотности и химического состава, все в связке с соответствующими физическими свойствами.

Постоянное улучшение программного пакета USIM PAC позволило принимать во внимание новые типы доступных данных, таких, как количественная минералогия, на ранних стадиях горно-обогатительных проектов. Это позволяет точно моделировать или оптимизировать циклы тяжелосредной сепарации принимая во внимание фактическое поведение частиц в соответствии с их составом.

Компания с ограниченной ответственностью CASPEO
BP 36009 - 45060 ORLEANS 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, web: <http://www.procsim.ru/>, e-mail: sales@procsim.ru

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

Bosman, J., 2014. The art and science of dense medium selection. *Journal of The Southern African Institute of Mining and Metallurgy*, 114, 529-536.

Brochot, S., Durance, M.-V., Fourniguet, G., Guillaneau, J.-C., Villeneuve, J., 1995. Modelling of the Minerals Diversity: a Challenge for Ore Processing Simulation. *Proceedings EUROSIM'95 Conference, Vienna*, pp. 861-866.

Brochot, S., Villeneuve, J., Guillaneau, J.-C., Durance, M.-V., Bourgeois, F., 2002. USIM PAC 3: Design and Optimization of Mineral Processing Plants from Crushing to Refining. In *Mineral Processing Plant Design, Practice and Control* (ed: A.L. Mular, D.N. Halbe & D.J. Bartatt), pp. 479-494. The Society for Mining, Metallurgy, and Exploration, Inc, Littleton.

Brochot, S., Wiegel, R.L., Ersayin, S., Touze, S., 2006. Modelling and simulation of comminution circuits with USIM PAC. In *Advances in comminution* (ed: S.K. Kawatra), pp. 495-511. The Society for Mining, Metallurgy, and Exploration, Inc, Littleton.

Brochot, S., Durance, M.-V., Botane, P., Cailleau, A., 2010. Modelling and Simulation to Design a Flotation Circuit for Gold Concentration. In: *Proceedings of XXV International Mineral Processing Congress, Brisbane*, pp. 3151–3162.

Brown, N.P., Heywood, N.I., 1991. *Slurry handling – Design of solid-Liquid Systems*. Elsevier Applied Science, London and New York.

Gonzalez, M., Brochot, S., Durance, M.-V., 2017. Plant Performance Forecasting Using Geometallurgical Data and Advanced Process Simulation Techniques. In: *Proceedings of Procemin GEOMET 2017, Santiago*, pp. 371–381.

Napier-Munn, T.J., 1991. Modelling and Simulating Dense Medium Separation Processes – A Progress Report. *Minerals Engineering*. 4 (3/4), 329–346.

Turton, R., Levenspiel, O., 1986. A short note on drag correlation for spheres. *Powder Technology*, 47, 83-86.