

## Точное моделирование руд для расчета процессов с учетом геометаллургических данных

**S. Brochot<sup>1</sup>, M. Gonzalez Fernandez<sup>2</sup> и M.V. Durance<sup>1</sup>**

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

<sup>2</sup> Caspeo Chile SpA, Сантьяго, Чили

### АННОТАЦИЯ

Хотя конечной целью металлургии является извлечение металлов из определенной руды, каждый знает, что достижение такой цели основывается на множестве шагов разделения, включающих значительно больше, чем двухфазный материал, состоящий из металла и пустой породы. Тем не менее, на сегодняшний день при проектировании и контроле технологических процессов в большинстве случаев учитывается только содержание металла, в лучшем случае – содержание металла по классам крупности. Возможность прогнозирования поведения потоков и производительности последующих операций при работе с столь неоднородными материалами, состоящими из нескольких минералов с различными размерами зерен и текстурой, подразумевает использование более точных моделей руд. На сегодняшний день доступны аналитические инструменты, способные дать релевантные и точные данные, применимые в геометаллургии. Для использования истинно геометаллургического подхода при проектировании технологических процессов, а также при их оптимизации, в рамках расчета совершенно необходимо комбинировать такие точные модели руд с математическими моделями операций. Встроенный в симулятор процессов USIM PAC инструмент для моделирования материалов, основанный на универсальном конфигурируемом критерии описания и иерархическом подходе, предоставляет гибкость, необходимую для описания любого типа руд практически без ограничений в части глубины детализации и физических свойств, встречающихся в горнорудной промышленности. Расчетный движок и математические модели операций обогащения спроектированы для управления таким многообразием моделей материалов. Настоящая статья представляет различные модели руд и применение некоторых из них при расчете технологических схем. Она доказывает интерес к такого рода подробному и продвинутому подходу к точному прогнозированию производительности фабрик.

### Ключевые слова

Расчет процессов обогащения полезных ископаемых, геометаллургия, моделирование руд

## **ВВЕДЕНИЕ**

Расчет процессов, выполняемый в рамках технологического проектирования или при оптимизации действующих схем, требует точного моделирования основных операций. В последние десятилетия основные усилия различных команд, разрабатывающих программное обеспечение для расчета и оптимизации технологических схем, были посвящены таким моделям для операций измельчения и физического разделения, таких, как флотация или гравитационная концентрация (Koјovic et al., 2012, Soni и Yoon, 2014). В большинстве случаев модель руды состоит из гранулометрического распределения, вещественного и минералогического составов. В мокрых процессах учитывается водная фаза. В целом использование моделей операций совместно с такими моделями материала, после некоторой корректировки параметров, позволяет получить хорошую сходимость экспериментальных и расчетных данных. Использование полученных комплексных математических моделей технологических схем (симуляторов) для целей компьютерного тестирования альтернативных конфигураций циклов обогащения или ключевых параметров основного оборудования может быть достаточно точным пока свойства обрабатываемой на фабрике руды близки к свойствам руды, которая была в производстве при построении симулятора. Вместе с тем, при сильных скачках качества руды по причине, например, различных пропорций минералов или размеров зерен, результаты расчетов могут обладать низкой точностью. Поскольку любое физическое разделение, такое, как гравитационное, магнитное или флотационное, разделяет не металл и пустую породу, но частицы, состоящие из минералов, содержащих металлы, единственным способом обеспечения точности, достаточной для прогнозирования поведения схемы, является моделирование таких частиц. Инструмент построения фазовой модели, встроенный в программный пакет для расчета технологических схем обогащения полезных ископаемых USIM PAC, дает такую возможность. Тем не менее, поскольку такой объем данных не всегда доступен для анализа, инструмент был спроектирован с высоким уровнем гибкости, что позволит адаптировать модель к имеющимся данным. В настоящей статье мы представим принципы работы указанного инструмента для концептуального моделирования материала, а также несколько примеров, иллюстрирующих гибкость модели материала и преимущества наличия такой гибкости.

### **Концептуальная модель материала**

Модель материала, реализованная в программном пакете USIM PAC, комбинирует две основных концепции: критерий описания и иерархию описания. Критерий описания разделяет фазу материала на классы, которых может быть столько, сколько необходимо. Основными критериями, часто встречающимися в обогащении полезных ископаемых, являются гранулометрическое распределение, химический или минералогический состав. Критерием также может быть тип частиц, представляющий, например, классы плотности (Donskoi et al.,

2005), классы раскрытия (Brochot et al., 2006; Brochot и Botané, 2012, Zhang, 2016) или классы по флотационной способности.

Иерархии в свою очередь организуют критерии в части их содержимого. Иерархии могут быть 0, 1 или 2 уровня. Рассмотрим фазу  $P$  для которой первый критерий содержит  $n$  классов  $i$ , а второй критерий –  $m$  классов  $j$ , тогда:

- $Q$ , количество фазы  $P$ , это иерархия 0 уровня
- $S$ , содержание классов  $i$  в фазе  $P$ , и  $T$ , содержание классов  $j$  в фазе  $P$ , это иерархии 1 уровня
- $U$ , содержание классов  $i$  в классах  $j$  в фазе  $P$ , это иерархия второго уровня.

В качестве примера, рудная фаза может быть описана двумя критериями: гранулометрическим распределением и компонентным составом (содержание химических элементов или минералов). В этом случае  $Q$ , иерархия 0 уровня, это расход руды.  $S_i$ , иерархия 1 уровня, это доля класса  $i$  в руде.  $T_j$ , иерархия 1 уровня, это содержание компонента  $j$  в руде.  $U_{ij}$ , иерархия 2 уровня, это содержание химического элемента  $j$  в классе крупности  $i$ .

Число критериев каждой фазы, как и число классов в каждом критерии – не ограничено. При использовании более двух критериев могут быть определены несколько иерархий 2 уровня. Число фаз также не ограничено. Таким образом становится возможным отслеживать несколько фаз твердого (руды, осадки, уголь...), несколько фаз жидкого (вода, растворители, насыщенные растворы...) или несколько газовых фаз, все в рамках единой схемы.

Свойства могут быть определены как для каждого критерия, так и для фазы в целом. В настоящий момент доступно четыре свойства: плотность, магнитная восприимчивость, молекулярная масса и низшая теплотворная способность. Другие типы могут быть с легкостью добавлены, если потребуются для моделирования определенной операции, что даст дополнительную гибкость системе.

С такой гибкой структурой становится возможным описать широкий спектр параметров материала. Ниже будут приведены примеры, демонстрирующие преимущества такой гибкости. Указанная структура, реализованная в программном пакете USIM PAC в начале 90х (Durance et al., 1993, Brochot et al., 1995), может использовать комплексные данные, доступные сегодня, но редко получаемые в то время, такие, как количественные минералогические характеристики (Donskoi et al., 2005, Graham et al., 2015, Strongman et al., 2017).

Вместе с тем, для предварительного расчета или для решения простых оптимизационных задач не всегда возможно получить расширенный объем данных, или стоимость их получения не оправдывает вложений. Чтобы сохранить широкие возможности применения программного решения, необходимо, чтобы была возможность использовать его также и с простейшими моделями материала. Это предполагает, что математические модели операций должны уметь работать с различными моделями материала. Поэтому была определена концепция Метамоделей (Metamodel). В рамках такой концепции модель каждой операции включает набор основных



функций, которые позволяют модели операции отработать на минимально необходимой модели материала, а также общий для всех моделей операций интерфейс, который переводит модели материала, определенные пользователем, в модели материала, необходимые для работы моделей операций.

### Расширенные фазовые модели для циклов измельчения и классификации

Несомненно, одним из первоочередных применений для такого подробного описания материала являются процессы измельчения и классификации. Руда состоит из различных минералов, каждый из которых обладает различными характеристиками, а значит – различным поведением в рамках операций измельчения и классификации.

Чтобы учесть специфическое поведение различных минералов, важно не только подробно описать руду, но и использовать модели операций, способные принять во внимание все такие данные. Рисунок 1 показывает схему классического цикла измельчения и классификации. Модель гидроциклона выведена из модели Plitt, модель шаровой мельницы относится к кинетическим моделям. Обе модели могут принять во внимание различные минералы, представленные в руде.

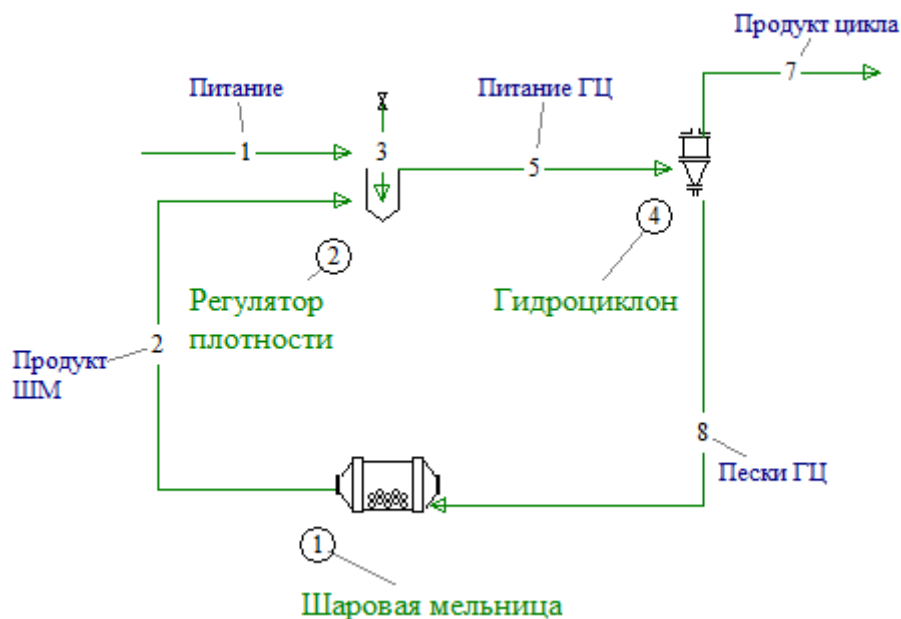


Рисунок 1 – Схема цикла измельчения и классификации

Фазовая модель описывает пульпу, обрабатываемую в цикле, двумя фазами: твердой фазой, описанной классами крупности и компонентами; и жидкой фазой, описанной ее плотностью. Рисунок 2 показывает описание фаз и наиболее важные характеристики руды.

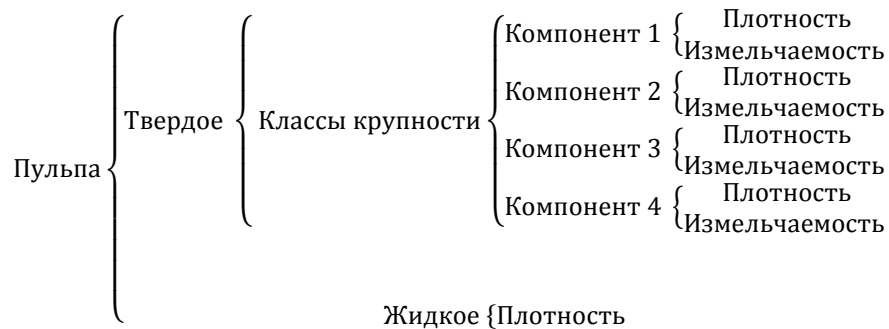


Рисунок 2 – Описание фазы Пульпа

Такой формат позволяет описать твердое через компоненты по классу крупности. На практике не всегда возможно с легкостью получить минералогический или химический состав по каждому классу, при этом измерения, включающие различные классы крупности, проводят часто. Это может оказаться более чем достаточным для начала работы.

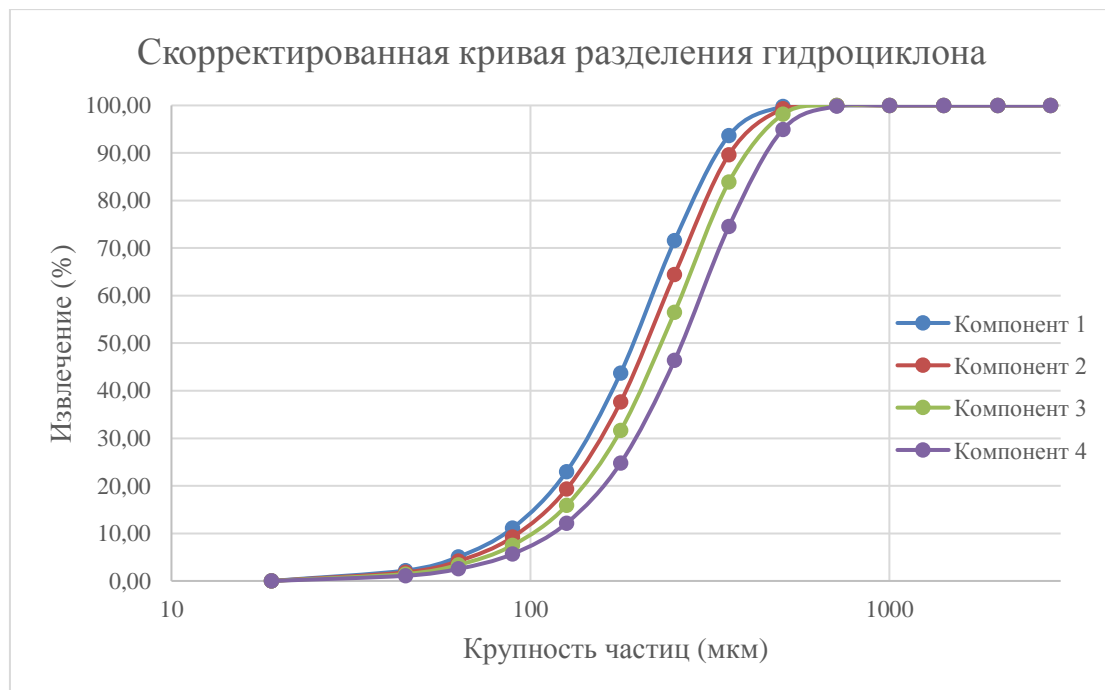


Рисунок 3 – Скорректированные кривые разделения по компоненту

Комбинация расширенной фазовой модели и продвинутых моделей операций могут дать важные результаты, такие, как кривые разделения гидроциклона или кривые гранулометрического распределения продукта мельницы по компоненту. Рисунок 3 показывает влияние плотности компонентов на скорректированную кривую разделения гидроциклона по компоненту. Рисунок 4 показывает сравнение гранулометрического распределения питания и продукта шаровой мельницы для двух компонентов с различной измельчаемостью.

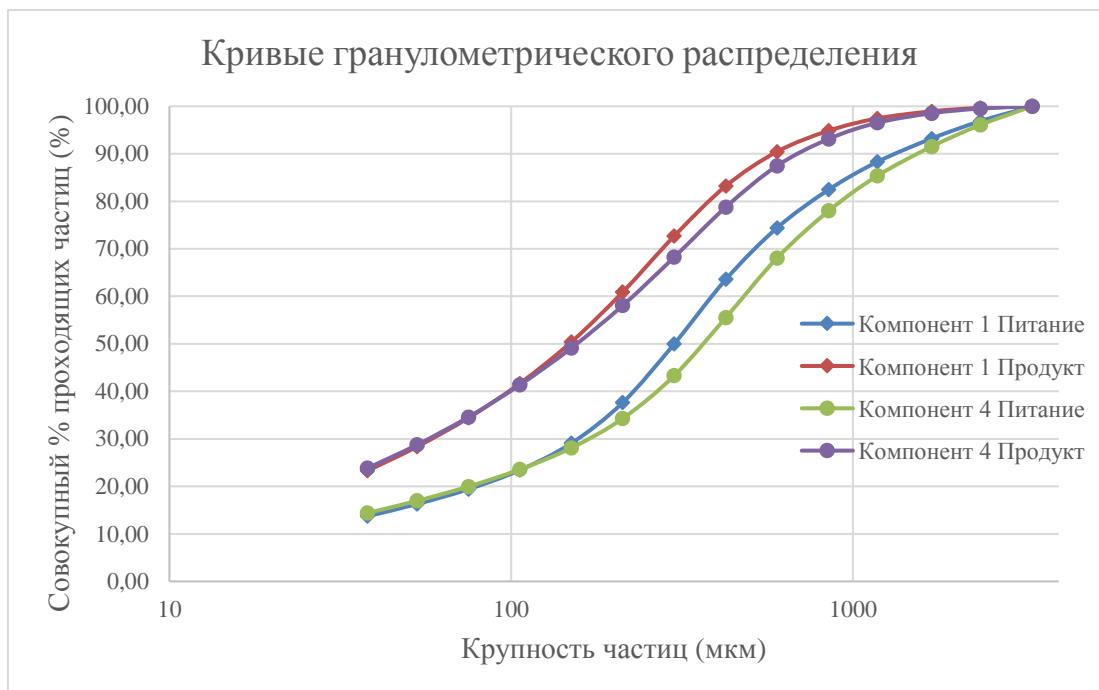


Рисунок 4 – Кривые гранулометрического распределения по компоненту

### Расширенные фазовые модели для пенной флотации

Пенная флотация является одним из наиболее используемых методов обогащения, в особенности для сульфидных руд. Она также применима для меди, цинка, свинца, золота, серебра, платины, фосфатов, углекислого калия... Поскольку флотация представляет собой физикохимический процесс, основанный на поверхностных свойствах минералов, для моделирования и расчета очень важно надлежащим образом описать обогащаемый материал. Наиболее важными параметрами являются гранулометрическое распределение и химический состав. Они же являются наиболее используемыми параметрами для описания руды при моделировании флотации. Хотя они и не являются лучшим выбором для всех случаев.

Следующий пример, представляющий флотацию медной руды, отчетливо показывает важность подробного описания материала. Для расчета флотации применяется кинетическая модель, в которой присутствует зависимость от размеров частиц. Материал питания может быть описан несколькими различными способами. Наиболее очевидный из них заключается в том, чтобы принять во внимание классы крупности и содержание меди. Другой – в том, чтобы учесть также и минералогические данные. Эти два подхода описаны на рисунках 5 и 6.

$$\text{Руда} \left\{ \begin{array}{l} \text{Классы крупности} \\ \text{Другие компоненты} \end{array} \right\} \left\{ \begin{array}{l} \text{Медь} \\ \text{Железо} \\ \text{Другие компоненты} \end{array} \right.$$

Рисунок 5 – Базовое описание фаз руды (модель А)

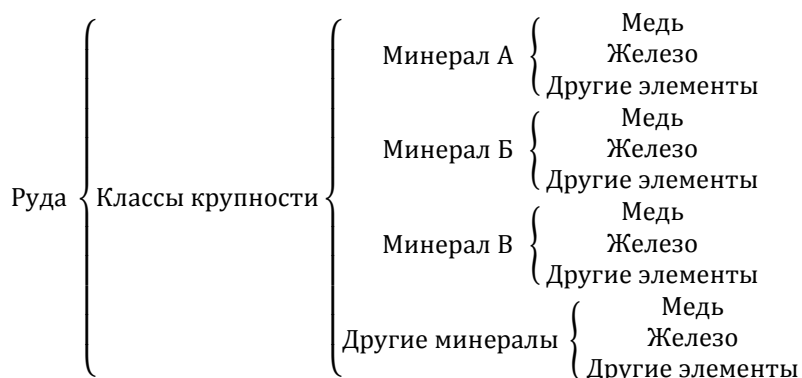


Рисунок 6 – Расширенное описание фаз руды (модель Б)

Модель А описывает руду в терминах химического состава по классу крупности. Модель Б использует минералогический состав по классу крупности, а также дает информацию по содержанию меди через химический состав минералов. Математическая модель флотации работает с химическим составом по классу крупности (модель А) или минералогическим составом по классу крупности (модель Б), ее кинетическая составляющая связана с таким описанием материала.

В рамках обследования фабрики обе модели были откалиброваны для точного воспроизведения производительности процесса в части извлечения, содержания меди в концентрате и хвостах, а также выхода (см. таблицу 1).

Таблица 1 – Сравнение сценариев

Модель	Откалиброванная на основании данных обследования фабрики		Новое питание	
	Cu в питании = 0.67 %		Cu в питании = 0.59 %	
	Cu в концентрате (%)	Извлечение Cu (%)	Cu в концентрате (%)	Извлечение Cu (%)
Обследование	9.41	85.44	-	-
Модель А	9.43	85.44	8.52	85.43
Модель Б	9.40	85.35	8.47	85.68

Основное различие между моделями проявляется, когда изменяется минералогический состав руды. Например, содержание меди в питании фабрики снижается с 0.67% до 0.59%. Изменение содержания меди было обусловлено изменением содержания минералов, включающих медь: содержание минерала А снизилось с 0.36% до 0.33%, содержание минерала

Б – с 0.16% до 0.14%, минерала В – с 0.81% до 0.68%. Основные результаты для нового сценария представлены в таблице 1.

Результаты отличаются незначительно и оба могут быть рассмотрены как приемлемые. Хотя результаты, полученные при использовании модели Б, являются более точными и лучше отражают фактическое поведение руды, поскольку указанная модель учитывает каждый минерал в отдельности в то время, как модель А учитывает лишь среднее по всем минералам. Рисунок 7, на котором показаны кривые извлечения для обеих моделей, поясняет эту идею.

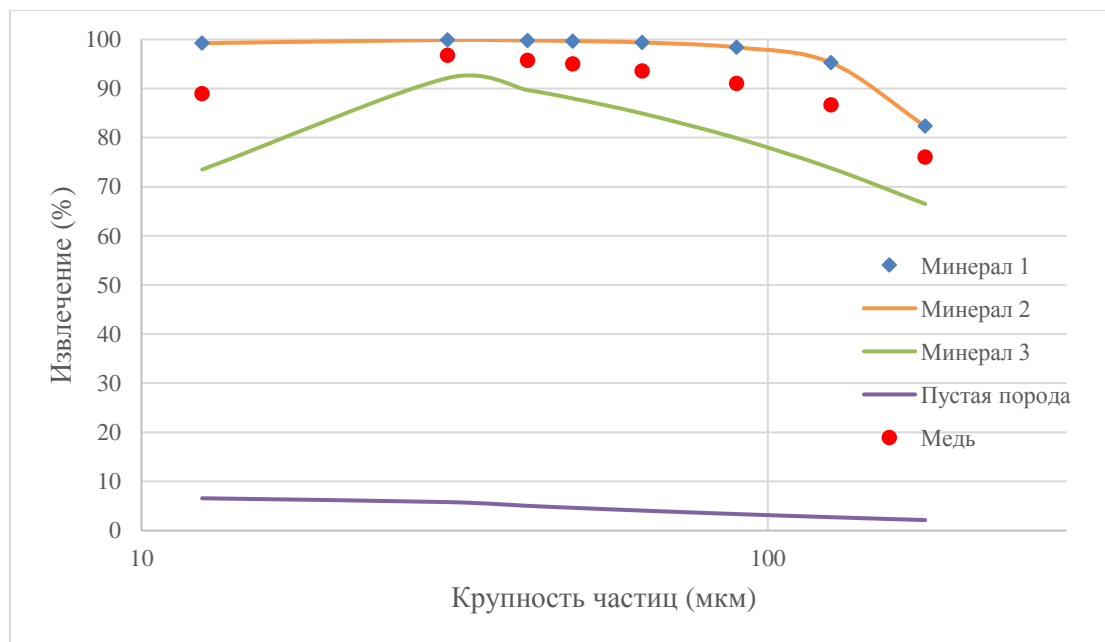


Рисунок 7 – Извлечение меди (модель А) и минералов и пустой породы (модель Б)

Хотя не все задачи требуют такого уровня детализации, если данные доступны, подробное описание материала и процессов обеспечит получение наиболее надежных результатов и точное прогнозирование производительности предприятия.

### Расширенная фазовая модель для обогащения угля

Еще одной областью применения подробного описания материала является промывка угля. Уголь является комплексным минералом. Хотя с коммерческой точки зрения такие компоненты, как сера, являются ключевыми, в рамках обогащения уголь обычно описывают через содержание угля и зольность. Указанные два компонента обладают значительно различающимися показателями удельного веса. Содержание золы влияет на удельный вес частиц и эту разницу возможно использовать для обогащения.





Промывка угля включает несколько операций, таких, как дробление, грохочение и гравитационное обогащение. Последнее включает ряд наиболее важных процессов и является той операцией, для расчета которой использование подробного описания материала имеет значение.

Точкой отсчета, с которой можно начать описание угля, может быть вещественный состав по классу крупности. Это хорошо работает с моделями, учитывающими как классы крупности, так и удельный вес. При этом также возможно пойти на шаг дальше и описать руду в части типов частиц, характеризующихся по плотности (классы плотности). В этом случае каждый тип частиц связывается с содержанием угля и золы через матрицу конверсии, определяющую уголь и зольность по типу частиц (см. рисунок 8 и таблицу 2).

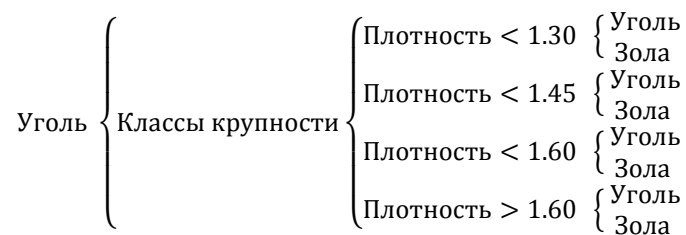


Рисунок 8 – Расширенное описание фазы угля

Таблица 2 – Матрица конверсии, определяющая вещественный состав по типу частиц

Тип частиц	Зола	Уголь
УВ < 1.30	1,92	98,08
УВ < 1.45	16,32	83,68
УВ < 1.60	30,68	69,32
УВ > 1.60	74,02	25,98

Такое описание содержит больше информации и при этом дает также и базовые данные – уголь и зольность по классу крупности.

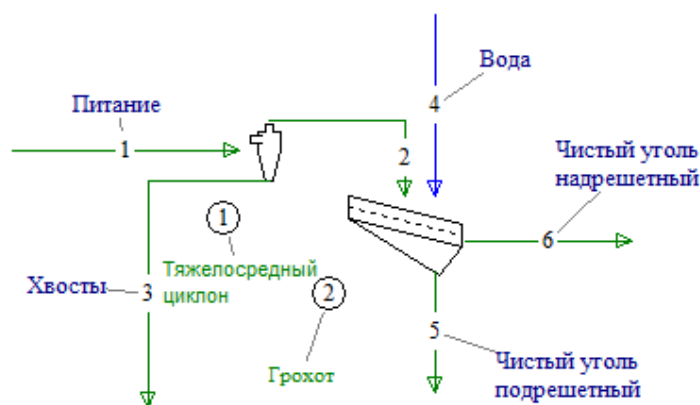


Рисунок 9 – Секция схемы промывки угля

Рисунок 9 показывает схему небольшого участка фабрики для обогащения угля, для расчета которой используется приведенное выше описание материала. При использовании указанной конфигурации фаз, симулятор будет работать по типам частиц, и при этом будет способен дать результат и в части вещественного состава. Рисунок 10 показывает извлечение по типу частиц (по классам плотности) в потоке слива циклона.

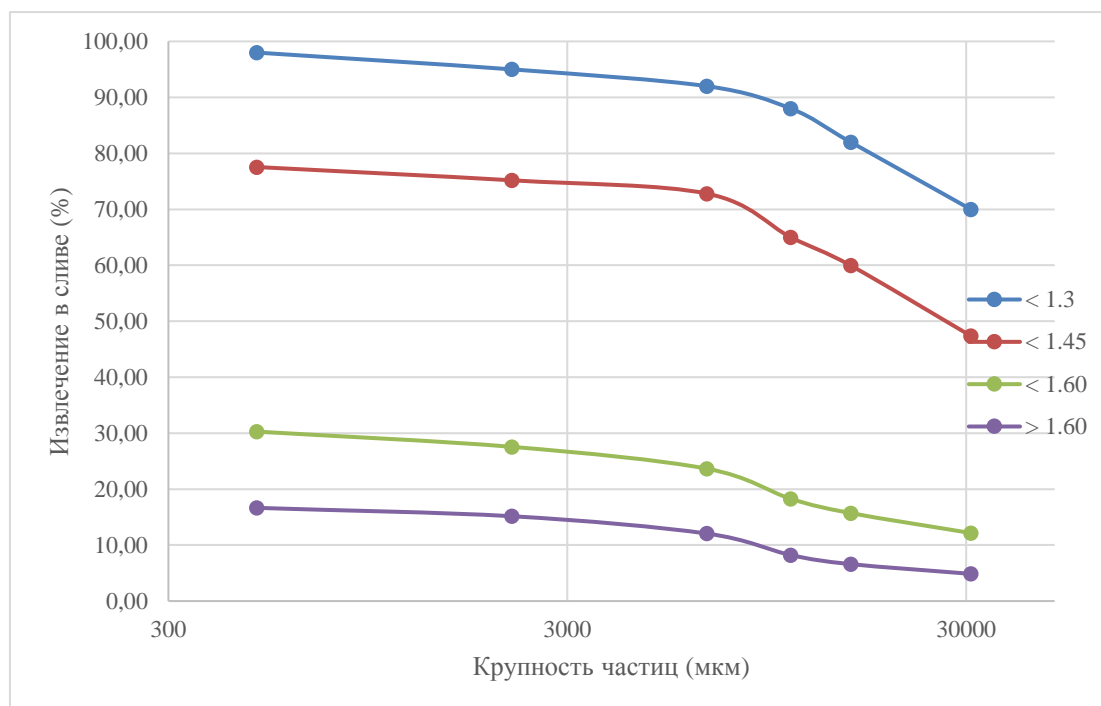


Рисунок 10 – Извлечение по типу частиц в тяжелосреднем циклоне

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В последние годы развитие технологий для подробной характеристики руд сделало доступным большой объем данных, ценность которых проявляется не только в части первичного анализа поведения материала, но и при использовании в рамках моделирования процессов. Перевод такого объема данных в модель материала стал ключом для их использования в рамках программных симуляторов технологических схем. В части разнообразия наблюдаемых свойств, необходимо было построить гибкую модель. Обобщение описания материала с использованием концептуального подхода позволило создать мощный инструмент моделирования руд, встроенный в программный пакет для расчета и оптимизации технологических схем USIM PAC.

Гибкость инструмента позволяет создавать простые модели материала, когда подробные данные недоступны или когда такая характеристика экономически нецелесообразна. При использовании на руде с относительно постоянными характеристиками, симулятор позволит оптимизировать ключевые настройки основного оборудования, операционные параметры, или

конфигурацию схемы, что приведет к улучшению производительности при достаточно низких затратах.

Вместе с тем, как было показано выше, когда подробные данные доступны, расширенное описание материала очевидно улучшает возможности прогнозирования при моделировании процессов, что в конечном итоге даст более точные результаты. Симулятор, построенный на основе расширенной модели материала и продвинутых математических моделей основных операций, позволит протестировать широкий круг идей по оптимизации фабрики с уровнем надежности, недостижимым при использовании простых моделей руд. Когда целью расчета является прогнозирование производительности фабрики в долгосрочной перспективе, это становится критически важным.

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](mailto:info@caspeo.net)

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

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

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 of the 1995 EUROSIM Conference, EUROSIM'95. Vienna, Austria. pp. 861-866.

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

Brochot, S., Botane, P., 2012. Modelling of Crumbling and Mineral Liberation during Crushing using “Natural Grain Size Distribution” for Friable Ores. Proceedings of the XXVI IMPC. India, pp 668-682.

Donskoi, E., Suthers, S.P., Clout, J.M.F., Campbell, J.J., 2005. Prediction of Hydrocyclone Performance in Iron Ore Beneficiation Using Virtual Modelling. Proceedings of Iron Ore Conference 2005. Australia, pp 321-330.

Durance M.-V., Guillaneau J.-C., Villeneuve J., Fourniguet G., Brochot S., 1993. Computer Simulation of Mineral and Hydrometallurgical Processes: USIM PAC 2.0, a Single Software from Design to Optimization. Proceedings of the International Symposium on Modelling, Simulation and Control of Hydrometallurgical Processes, Québec, Canada, 109-121.

Graham, S., Brough, C.P., Cropp, A., 2015. An Introduction to Zeiss Mineralogic Mining and the correlation of light microscopy with automated mineralogy: a case study using BMS and PGM analysis of samples from a PGE-bearing chromite prospect. Precious Metals Conference, Vienna, Austria.

Kojovic, T., Powell, M. S., Bailey, C. Drinkwater, D., 2012. Upgrading the JK SAG Mill Model. Proceedings of SAG 2011, Vancouver, Canada.

Soni, G., Yoon, R.H., Validation of a First Principles Flotation Model, Proceeding of SME 2014, Salt Lake City, USA

Strongman, J., Brough, C., Fletcher, J., Garside, R., Prinsloo, A., Tordoff, B., 2017. Optimising Automated Mineralogy for Operational Mine Site Applications. Process Mineralogy, Cape Town, South Africa.

Zhang, J., and N. Subasinghe, G.K., 2016. Development of a flotation model incorporating liberation characteristics. Minerals Engineering 98, 1-8.