

ЗОНА РАЗДЕЛЕНИЯ В ОБОГАТИТЕЛЬНЫХ АППАРАТАХ

Цеховой Петр Алексеевич – ТОО АНТАЛ, Генеральный директор
Якунин Александр Иванович – ТОО АНТАЛ, Зав. отделом
Музгина Вера Сергеевна – ТОО ГОРНОЕ БЮРО, ученый секретарь
Якунин Игорь Александрович – ТОО ТРАНЕ, технический эксперт

В настоящее время, применяются коэффициенты перехода при расчете параметров оборудования от лабораторных исследований до принятия параметров по расчетам проектировщиков. Зачастую, этот коэффициент принимается в интервалах 0,8-0,85 и не имеет под собой четкого обоснования. К тому же, применения этого ориентировочного и необоснованного коэффициента не всегда позволяет достаточно точно рассчитать оборудование для промышленного применения при обогащении полезных ископаемых и при гидрометаллургических процессах. Разумеется, имеется целая гамма коэффициентов пересчета, с учетом особенностей работы каждого аппарата. Это и коэффициент заполнения, коэффициент эффективности использования объема аппарата и др. Конечно, все эти коэффициенты необходимо учитывать и их применение позволяет существенно уменьшить степень ошибки при расчетах и достаточно точно приблизиться в промышленных условиях к лабораторным экспериментальным данным, которые всегда выше, чем при реализации проекта.

В априори известно, что в обогатительном или гидрометаллургическом аппарате при непрерывном режиме технологического процесса существует зона наличия исходного материала для разделения по физическим, физикомеханическим, физико-химическим свойствам, зона формирования концентрата, зона формирования хвостов и зона разделения исходного материала на концентрат и хвосты. При дискретных опытах в объеме аппарата получают, например концентрат, а все остальное считают хвостами. В замкнутом цикле экспериментирования вносятся определенные поправки для расчета за счет вывода промежуточного продукта после стабилизации всех показателей и качественных характеристик получаемых продуктов разделения, но все равно, за основу расчетов принимаются данные, полученные в лабораторных условиях при реализации дискретных опытов. Получается, что абсолютно не учитывается зона разделения в аппаратах, хотя именно из нее происходит формирование продуктов разделения – формирование концентрата и хвостов. Иными словами, при расчетах практически не учитывается объем зоны разделения. Наша задача – определить необходимый объем зоны разделения в аппаратах и учитывать этот объем при расчетах и выборе оборудования.

Из всех видов разделительных процессов, с точки зрения математического описания, наиболее сложным является обогащение руд. В обогатительных процессах встречается самый широкий диапазон концентраций ценных компонентов в исходном сырье и продуктах обогащения. Наличие сростков минералов дает в процессе целую гамму частиц с промежуточными свойствами между ценными компонентами и пустой породы.

Процессы обогащения могут адекватно описываться только моделями со статически распределенными параметрами. Для моделирования и описания разделительных процессов может использоваться многомерный спектр свойств частиц. Процессы, в которых одновременно осуществляется перемешивание частиц и упорядоченное движение их вверх или вниз, описываются уравнением Фоккера-Планка следующего вида.

$$\frac{\partial W}{\partial t} = -\frac{\partial}{\partial t}[c(t, z)W] + \frac{1}{2} \frac{\partial^2}{\partial z^2}[b(t, z)W] \quad (1)$$

$c(t, z)$, $b(t, z)$ – коэффициенты, зависящие в общем случае от времени t и координаты слоя z .

Вероятность перехода группы однородных частиц от слоя к слою зависит от глубины опускания y . Функция полной вероятности этого перехода

$$W(y, t + \Delta t) = pW(y - \Delta y, t) + qW(y, t) \quad (2)$$

Разложение этой функции в ряд Тейлора приводит к уравнению

$$W(y, t) + \frac{\partial W(y, t)}{\partial t} \Delta t = p \left[W(y, t) - \frac{\partial W(y, t)}{\partial y} \Delta y + \frac{1}{2} \frac{\partial^2 W(y, t)}{\partial y^2} (\Delta y)^2 \right] + qW(y, t) \quad (3),$$

где – $W(y, t)$ - вероятность задержки частицы в слое.

Если вероятность перехода из зоны концентрации в зону распределения и обратно равны, то уравнение примет вид

$$\frac{\partial W(y,t)}{\partial t} = -\rho \frac{\Delta y}{\Delta t} \cdot \frac{\partial W(y,t)}{\partial t} + \frac{1}{2} \rho \frac{(\Delta y)^2}{\Delta t} \frac{\partial^2 W(y,t)}{\partial y^2} \quad (4), \text{ где}$$

$\rho \frac{\Delta y}{\Delta t}$ - скорость перемещения;

$\frac{1}{2} \rho \frac{(\Delta y)^2}{\Delta t}$ - разброс (дисперсия) вокруг центра распределения.

Иными словами, скорость перемещения и разброс пропорциональны вероятности перехода частиц из одной зоны в другую.

В работе авторы рассматривают взвесь частиц как некоторую сплошную среду, обладающую определенными физическими признаками, по которым производится разделение частиц. При этом различаются средние и мгновенная (случайная) скорости частиц.

Влияние перемешивания учитывается введением дополнительной градиентной силы, действующей на частицы. Физический смысл ее состоит в стремлении к выравниванию концентрации частиц с определенными свойствами при их беспорядочном перемешивании в отсутствие разделительных сил. Это порождает квазисилу, пропорциональную градиенту концентрации. Для этого случая предложено следующее уравнение, выражающее равновесие действующих на частицу сил при перемешивании инерционными силами:

$$V\rho_T q - V_g \left[(1-m) \int_{\rho_n}^{\rho_T} \gamma d\rho_T + m\rho_{cp} \right] - V k_m \frac{1}{\gamma(\rho_T)} \text{grad} \gamma \rho_T - \alpha v = 0 \quad (5), \text{ где}$$

V – объем частицы;

ρ_T – плотность частицы;

m – разрыхленность;

q – вектор ускорения силы тяжести;

ρ_{cp} – средняя плотность среды;

v – вектор средней скорости;

k_m, α – коэффициенты.

В другой работе показано, что физической основой моделирования разделительных процессов все в большей степени становится термодинамический анализ и оптимизация циркуляционных потоков. Например, для гравитационных процессов по аналогии с некоторыми другими физическими процессами, предложена зависимость убыли потенциальной энергии смеси частиц от времени при их разделении, имеющая вид:

$$\frac{d\Delta E t}{dt} = -K\Delta E t \quad (6), \text{ где}$$

$\Delta E t$ – разность потенциальной энергий системы в момент времени t и после разделения ;

K – коэффициент пропорциональности, не зависящий от времени.

Интегрирование этого уравнения приводит к следующей зависимости :

$$\Delta E t = \Delta E e^{-kt} \quad (7)$$

Эта зависимость показывает, что скорость гравитационного процесса убывает во времени. Коэффициент зависит от условий ведения процесса и должен определяться экспериментально. Аналогичная точка зрения была высказана в, применительно к процессу отсадки. Авторы предложили, что количество легкой фракции, выделяющейся в единицу времени в отсадочной машине, пропорциональна количеству этой фракции, находящейся в зоне разделения. При указанном предложении зависимость извлечения легкой фракции от времени имеет вид :

$$E = 1 - e^{-kt}$$

Аналогичный вид имеет уравнение Белоглазова для флотационных процессов обогащения.

Ю. В. Рубинштейном в работе предложено уравнение процесса разделения, применительно к флотации с учетом перемешивающихся факторов.

$$\frac{\partial C_p}{\partial t} = k_1 C_p + k_2 C_b - \text{div}(V_p C_p) \quad (9)$$

$$\frac{\partial C_b}{\partial t} = k_1 C_p - k_2 C_b - \text{div}(V_b C_b) \quad (10), \text{ где}$$

$C_p(x_1, x_2, x_3, t)$ и $C_b(x_1, x_2, x_3, t)$ – концентрация твердых частиц в жидкой фазе и на воздушных пузырьках соответственно;

$V_p = \{V_{px}, V_{py}, V_{pz}\}$ и $V_b = \{V_{bx}, V_{by}, V_{bz}\}$ – вектор скоростных потоков;

k_1, k_2, V_p, V_b – функции пространственных координат и времени.

В выше перечисленных работах фигурирует понятие «зона разделения», однако нет достаточных данных для качественных и количественных ее характеристик.

Однако, значительная часть авторов выводят кинетические зависимости процессов, беря за основу отправную точку, зону разделения. В этой сфере нами предложена качественная и количественная характеристика зоны разделения.

Известное уравнение массопереноса, интерпретированное применительно к разделительным процессам

$$\frac{dq_k}{dt} = k_1 Q_p \quad (11)$$

k_1 – скорость перевода q_k из зоны разделения в зону концентрации или концентрата.

В данном уравнении необходимо учесть и возможность обратного перехода. Для флотации это осыпание минеральных частиц из пенного слоя, для гравитационных процессов – это перемещение легких и тяжелых минеральных частиц в зоны с повышенной и пониженной средней плотностью соответственно. С учетом этого, уравнение преобразуется к виду

$$\frac{dq_k}{dt} = k_1 Q_p - k_2 q_k \quad (12)$$

Это выражение представляет собой наиболее полное уравнение кинетики разделительных процессов, широко используемое, например, в химической технологии. Однако, кроме обратного перехода из зоны концентрации в зону разделения некоторой части минеральных частиц, для этой части минеральных частиц существует возможность перехода обратно в зону концентрации и т.д. Иными словами

$$\begin{aligned} \frac{dq_k}{dt} &= -k_1 Q_{pk} - (-k_2 q_k + k_1 k_2 q_k - k_1 k_2^2 q_k + k_1^2 k_2^2 q_k - k_1^2 k_2^3 q_k + k_1^3 k_2^2 q_k - \dots - k_1^{n-1} k_2^n q_k + k_1^n k_2^n q_k) = -k_1 Q_p \\ &- \left[-k_2 q_k \sum_{n=1}^{\infty} (k_1 k_2)^{n-1} + q_k \sum_{n=1}^{\infty} (k_1 k_2)^n \right] = -k_1 Q_p + \frac{1-k_2}{1-k_1 k_2} q_k \end{aligned} \quad (13)$$

Процессы разделения обычно представлены вводом в разделительный аппарат какого-то питания и вывода двух и более продуктов разделения. Для простейшего случая, когда в аппарат поступает исходное питание, а выходит два продукта разделения – концентрат и хвосты.

Следовательно, для выделения хвостов из зоны разделения, также можно записать

$$\frac{dq_{xb}}{dt} = -k_2 Q_{p_{xb}} + \frac{(1-k_1)}{1-k_1 k_2} q_{xb} \quad (14)$$

Суммируем эти два уравнения

$$\frac{dq_{xb}}{dt} + \frac{dq_k}{dt} = -k_2 Q_{p_{xb}} - k_1 Q_{pk} + \frac{(1-k_1)q_x + (1-k_2)q_k}{1-k_1 k_2} \quad (15)$$

Процесс разделения становится стационарным при равенстве нулю первых производных, т.е.

$$\frac{dq_x}{dt} + \frac{dq_k}{dt} = 0 \quad (16)$$

Тогда уравнение (15) преобразуется в следующее

$$Q_{pk}k_1 + Q_{px}k_2 = \frac{(1-k_1)q_{xb} + (1-k_2)q}{1-k_1k_2} \quad (17)$$

Сделав допущение, что $k_1+k_2 = 1$ получим

$$\begin{aligned} [Q_p] &= \left\{ \begin{array}{l} k_1 = 1 \\ k_2 = 0 \end{array} \right\} = Q_{ucx} - q_{xb} = q_k \\ [Q_p] &= \left\{ \begin{array}{l} k_1 = 0 \\ k_2 = 1 \end{array} \right\} = Q_{ucx} - q_{xb} = q_{xb} \\ [Q_p] &= \left\{ \begin{array}{l} k_1 = 0,5 \\ k_2 = 0,5 \end{array} \right\} = 1,33Q_{ucx} \end{aligned} \quad (18)$$

Из этого можно сделать вывод, что зона разделения существует независимо от $Q_{исх}$, K_1 , k_2 , и является величиной постоянной для разделительных аппаратов.

Решив уравнение (13) относительно t получим

$$dt = \frac{dq_k}{-k_1Q_p + \frac{1-k_2}{1-k_1k_2}q} \quad (19)$$

Проинтегрировав данное уравнение, получим

$$t = \frac{1-k_1k_2}{1-k_2} \ln \left[-k_1Q_p + \frac{1-k_2}{1-k_1k_2}q_k \right] + c \quad (20)$$

где c – постоянная величина.

С учетом ограничений, т.е

При $t=0$; $q_k=0$; $Q_p=Q_{исх}$

При $t=\infty$; $q_k=q_k$; $Q_p=Q_p$

$$t = \frac{1-k_1k_2}{1-k_2} \ln \left[\frac{-k_1Q_{исх}}{-k_2Q_p + \frac{1-k_2}{1-k_1k_2}q_k} \right] = \frac{1-k_1k_2}{1-k_2} \ln \left[\frac{1}{\frac{Q_p}{Q_{исх}} - \frac{(1-k_2)}{k_1(1-k_1k_2)} \frac{q_k}{Q_{исх}}} \right] \quad (21)$$

Обозначим $a = \frac{1-k_1k_2}{1-k_2}$, тогда

$$t = a \ln \left[\frac{1}{\frac{Q_p}{Q_{исх}} - \frac{1}{k_1a} \frac{q_k}{Q_{исх}}} \right] = a \ln \left[\frac{1}{\frac{Q_p}{Q_{исх}} - \frac{1}{k_1a} E} \right] \quad (22)$$

Анализ этого уравнения показывает, что $t \geq 0$ при

$$\frac{1}{\frac{Q_p}{Q_{исх}} - \frac{1}{k_1a} E} \geq 1 \quad (23)$$

Это условие достигается в том случае, если

$$\frac{Q_p}{Q_{исх}} - \frac{1}{k_1a} E \leq 1 \quad (24)$$

Или

$$\frac{Q_p}{Q_{исх}} \leq \frac{1}{k_1a} E \quad (25)$$

Допустим, что $Q_{исх}=1$, тогда

$$Q_{pk} \leq \frac{1}{k_1 a} q_k \left\{ \begin{array}{l} k_1 = 0,5 \\ k_2 = 0,5 \end{array} \right\}; Q_p \leq 1,33 q_k \quad (26)$$

Аналогично для хвостов

$$Q_{pk} \leq \frac{1}{k_2 b} q_{xb} \left\{ \begin{array}{l} k_1 = 0,5 \\ k_2 = 0,5 \end{array} \right\}; Q_p \leq 1,33 q_{xb} \quad (27)$$

После сложения получим

$$[Q_p] \leq 1,33 Q_{ucx} \quad (28)$$

Это является геометрическим определением зоны разделения определенного объема (33% от расчетного, который необходимо добавить к расчетному объему по существующим методикам расчета). Этот дополнительный объем зоны разделения необходимо учитывать при расчете оборудования, причем независимо от типов аппаратов, будь то флотомашин, отсадочные машины, магнитные или электростатические сепараторы, экстракторы и электролизеры. Вполне очевидно, что зона разделения по содержанию в ней полезного компонента не должна существенно отличаться от содержания этого компонента в исходном питании в этот аппарат. Иными словами, условными границами зоны разделения минералов в аппаратах, является условная поверхность с содержанием в точках условной поверхности, равной содержанию в исходном питании в этом аппарате. геометрическом объеме аппарата.

Практическое применение полученной закономерности осуществляется путем учета объема зоны разделения при расчете объема обогатительного аппарата. Например, до настоящего времени, первоначально время флотации подбирается экспериментальным путем, анализируется качество пенного продукта, а все остальное считается хвостами. Незначительную поправку вносят и опыты в замкнутом цикле, так как изначально уже неправильно определено время флотации. При разработке технологических регламентов, которые являются основным документом при проектировании ошибка становится существенной и может достигать до 30-35 %. Можно представить, что недопоставлено и фактически не установлено на производстве практически треть флотационных камер для достижения заявленных в проекте показателей обогащения. Кроме этого, абсолютно не учитываются такое основополагающее правило при обогащении, как равенство по качеству смешиваемых продуктов циркуляции. В настоящее время в большинстве технологических регламентах и исследовательских отчетах имеет место предлагаемая схема обогащения с разными по составу смешиваемых циркуляционных продуктов, что приводит к разбалансу технологии и к продолжительному времени настройки технологии обогащения, к перепроектированию и к судорожному поиску приемлемых решений уже при реализации проектов.

На основании вышеизложенного рекомендуем при переходе от лабораторных опытов к опытам в замкнутом цикле или к укрупненным испытаниям учитывать в расчетах зону разделения и сразу увеличить, например, время флотации, а также сорбции, экстракции, гравитационного обогащения на 30-40% и одновременно обеспечить равенство по качеству смешиваемых циркуляционных продуктов.

Теоретический вывод, полученный в настоящей работе получил свое подтверждение при его реализации на многих обогатительных фабриках, когда простое увеличение, например, объема флотации на 30% (установка дополнительных флотомашин, либо флотомашин с дополнительным объемом) позволило сразу выйти на проектные показатели и полностью подтвердить результаты лабораторных исследований.

Результаты настоящей работы рекомендуется при расчетах обогатительного оборудования учитывать в обязательном порядке зону разделения путем простого увеличения на 30-35% от расчетного значения рабочих объемов аппаратов, выполненных по существующим методикам. Настоящая и теоретически обоснованная рекомендация при реализации и использовании сложности не представляет и позволит исключить ошибок при применении результатов лабораторных исследований в проектировании новых объектов, и при реконструкции существующих объектов промышленности и практически сразу, после запуска в эксплуатацию, вывести предприятие на проектную мощность.