

И.К. МЛАДЕЦКИЙ, д-р техн. наук,

К.А. ЛЕВЧЕНКО, канд. техн. наук, **А.Н. ЧВИЛЕВА**

(Украина, Днепропетровск, Государственное ВУЗ "Национальный горный университет")

МЕТОДИКА СИНТЕЗА СТРУКТУРЫ ТЕХНОЛОГИЙ ОБОГАЩЕНИЯ ПОЛЕЗНЫХ ИСКОПАЕМЫХ

Постановка задачи. В обогатительной практике получили широкое распространение технологические критерии, оценивающие качество разделительных процессов. Подавляющее большинство из них связывают теоретически предельные показатели с их фактически достигнутыми в конкретной разделительной технологии или аппарате. Наиболее употребляемый из них – критерий Ханкока-Луйкена. Такое положение сложилось потому, что разработка обогатительных технологий велась (да и пока что повсеместно ведется) экспериментальным путем. Когда каким-то образом подготовленный продукт подвергался разделению, и только тогда открывались дальнейшие пути преобразования данного продукта в концентрат. Способы оценки потенциальных возможностей достижения заданного качества концентрата с помощью исследования раскрытия были громоздкими и представляли больше теоретический интерес. Гораздо проще выполнить разделение и по результатам оценок содержания ценного минерала в продуктах разделения осуществить прогнозирование дальнейшего технологического передела. Разделительный аппарат был индикатором раскрытия ценного минерала и поэтому давал возможность избежать громоздких исследований по подготовке сырья к сепарации.

Однако, теоретические исследования обогатительных процессов в конце концов привели к тому, что появились возможности численной оценки показателей измельчения, раскрытия, ожидаемых показателей качества продуктов разделения. Они основываются на известных значениях обогатительных признаков полезного ископаемого: измельчаемости, вкрапленности, содержания ценного минерала. В этом случае, на основании параметров подготовки сырья следует выполнить оценку целесообразности разделения, а для такой оценки требуется некоторый критерий, который бы учитывал параметры и подготовки, и разделения. Подготовка есть наиболее энергоемкий в мире процесс, поэтому, естественно, предлагается в первую очередь какой-либо экономический показатель. Но, теоретический синтез технологий основывается на системных характеристиках процессов и не учитывает тип или конструкцию технологического аппарата, а тем более мощность процесса. Оценка структуры технологических блоков, конструкций аппаратов, необходимой мощности, затрат других энергоносителей оценивается во вторую и третью очереди общего процесса синтеза любой технологии.

Таким образом, критерием выбора структуры обогатительной технологии должен быть технологический критерий. Если имеется какой-либо продукт, то

Загальні питання технології збагачення

по оценке крупности его частиц и остальным двум обогатительным признакам несложно с помощью этого критерия выполнить оценку перспективности применения операции разделения. То есть, **поиск структуры обогатительной технологии состоит из двух этапов: подготовили, оценили раскрытие, оценили перспективность применения разделительной операции.** Это значит, что необходимо определять, прежде всего, крупность помола частиц.

Изложение материала. Измельчительные аппараты и агрегаты имеют ограниченные возможности относительно достижения заданной крупности помола. А для достижения заданного качества концентрата необходимо соответствующее раскрытие, которое достигается определенным значением крупности. Оценим значение этой величины.

Проектирование обогатительных технологий для глубокого обогащения вкрапленных полезных ископаемых первую очередь требует определения количества стадий измельчения в соответствии с принципом Чечета: не измельчать ничего лишнего. Для этого необходима оценка начального и конечного значений крупности частиц руды. Начальным значением крупности частиц для глубокого обогащения является крупность частиц мелкого дробления и его оценка не вызывает трудностей. Конечное значение средней крупности помола связывают с требуемым значением качества концентрата. Поэтому для этого первоначально ориентируются на среднюю крупность вкрапления ценного минерала, а затем экспериментальными исследованиями обогатимости полезного ископаемого оценивают окончательное значение средней крупности помола.

Известно, что качество концентрата является заданной величиной $\beta_{КЗ}$, а на потери ценного компонента в хвостах наложено ограничение $v_x < v_{хдоп}$. Поиск зависимости будем вести на примере усредненных показателей железных руд Криворожского железорудного бассейна.

В работе [1] предложена формула, позволяющая в некоторой степени прогнозировать качество концентрата β , если известно содержание ценного минерала в исходной руде $\alpha_{И}$, показатель раскрытия R и показатель совершенства технологии разделения K

$$\beta_K = \alpha_{И} + RK(1 - \alpha_{И}). \quad (1)$$

Коэффициенты K и R зависят от технологии переработки полезного ископаемого и совместно определяют трудность обогащения полезного ископаемого. Коэффициент K определяет совершенство разделения, поэтому связан с видом сепарационных характеристик аппаратов, применяемых в технологии. Определим значения показателей, характеризующих технологию обогащения.

Показатель совершенства технологии разделения зависит от применяемых сепараторов и технологии их соединения. Экспериментально этот показатель может быть определен по результатам опробования технологических потоков.

Исследование фракционного состава твердой фазы пульпы хвостов и концентрата показало, что распределение сростков в этих продуктах имеют вид, приведенный в табл. 1. Среднее значение выхода концентрата $\gamma_\beta = 0,4$.

Загальні питання технології збагачення

Соотношения между узкими фракциями в обогащенном продукте имеет вид $\Delta\gamma_\beta = \Delta F_\beta \gamma$, а в обедненном $\Delta\gamma_v = \Delta F_v(1 - \gamma)$. Баланс узких фракций в продуктах разделения $\Delta\gamma_\alpha = \Delta\gamma_v + \Delta\gamma_\beta$.

Таблица 1

Зависимости распределения сростков в выходных продуктах обогащательной фабрики						
α	0	0,125	0,375	0,625	0,875	1,0
F_β	0,01	0,02	0,04	0,09	0,6	1,0
F_v	0,25	0,8	0,9	0,98	0,99	1,0

В соответствии с определением сепарационной характеристики она представляет собой отношение содержания фракции в концентрате к содержанию фракции в исходном продукте, т.е.

$$P = \frac{\Delta\gamma_\beta}{\Delta\gamma_\alpha} = \frac{\Delta F_\beta \gamma}{\Delta F_\beta \gamma + \Delta F_v(1 - \gamma)}. \quad (2)$$

В результате получена сепарационная характеристика технологической линии обогащения (ТЛО) (табл. 2)

Таблица 2

Сепарационная характеристика ТЛО						
α	0	0,125	0,375	0,625	0,875	1
P	0,024	0,012	0,17	0,29	0,97	0,96

Откуда видно, что она близка к идеальной. Поэтому принимается предположение, что разделение происходит ступенчато при значении $\alpha = \alpha_{II}$ и коэффициент совершенства технологии разделения на этом основании $K = 1$.

Таким образом, исходное выражение (1) принимает вид

$$\beta_{K3} = \alpha_{II} + R(1 - \alpha_{II}). \quad (3)$$

Из последнего соотношения определяется требуемое раскрытие для достижения желаемого качества концентрата

$$R_T = \frac{\beta_{K3} - \alpha_{II}}{1 - \alpha_{II}}. \quad (4)$$

На основании требований к качеству концентрата и потерям ценного минерала в хвостах можно записать

$$\gamma_T = \frac{\alpha_{II} - v_{ХДОП}}{\beta_{K3} - v_{ХДОП}}. \quad (5)$$

Загальні питання технології збагачення

Показатель раскрытия может быть выражен через параметры раскрытия: количество открытых рудных $P_{PЗ}$ и нерудных зерен $P_{НЗ}$, богатых $P_{НС}$ и бедных $P_{НС}$ сростков [2]:

$$R = \frac{P_{PЗ} + P_{PC}\alpha_{PC}}{P_{PЗ} + P_{PC}} - \frac{P_{НС}\alpha_{НС}}{P_{НС} + P_{НЗ}} = \alpha_P - \alpha_H, \quad (6)$$

где $\alpha_{НС} = \frac{\alpha_{И}}{2}$, $\alpha_{PC} = \frac{1 + \alpha_{И}}{2}$.

При сформулированных условиях разделения можно предположить, что

$$P_{PЗ} + P_{PC} = \gamma_T \quad \text{и} \quad P_{НС} + P_{НЗ} = 1 - \gamma_T, \quad (7)$$

а также, что

$$\alpha_P = \beta_{КЗ} \quad \text{и} \quad \alpha_H = \nu_{ДОП}. \quad (8)$$

Используя соотношения (6)-(8) имеем

$$\frac{P_{НС} \cdot \alpha_{НС}}{1 - \gamma_T} = \nu_{ХОП},$$

откуда:

$$P_{НС} = \frac{(1 - \gamma_T)\nu_{ХОП}}{\alpha_{НС}}. \quad (9)$$

а также

$$\frac{P_{PЗ} + P_{PC}\alpha_{PC}}{\gamma_T} = \beta_{КЗ},$$

откуда:

$$P_{PC} = \frac{2\gamma_T(1 - \beta_{RЗ})}{1 + \alpha_{И}}. \quad (10)$$

Содержания открытых фракций составит:

$$P_{PЗ} = \alpha_{И} - P_{PC}, \quad P_{НЗ} = 1 - \alpha_{И} - P_{PC}. \quad (11)$$

Загальні питання технології збагачення

Определим требуемые показатели раскрытия при таких исходных данных:

$$\alpha_H = 0,4; \beta_{K3} = 0,95; \nu_{ХДОП} = 0,05; \alpha_{HC} = 0,2; \alpha_{PC} = 0,7.$$

Показатели раскрытия следующие:

$$\begin{aligned} R_T &= \frac{0,95 - 0,4}{1 - 0,4} = 0,917, & \gamma_T &= \frac{0,4 - 0,05}{0,95 - 0,05} = 0,389, \\ P_{PC} &= \frac{(1 - 0,389)0,05}{0,2} = 0,153, & P_{H3} &= 1 - 0,4 - 0,153 = 0,444, \\ P_{PC} &= \frac{1 - 0,458 - 0,153 - 0,95 \times 0,389}{0,3} = 0,065; & P_{P3} &= 0,335. \end{aligned}$$

Вычисленное по этим показателям раскрытие дает значение $R_T = 0,902$.

Далее для определения требуемой крупности помола выберем одно из уравнений для расчета параметров раскрытия, например [2]

$$P_{P3} = \frac{\alpha_H}{d} \int_0^d \left(1 - \frac{d}{d_{BK}}\right) \exp\left(-\frac{d}{d}\right) dd$$

и с его помощью определим среднюю крупность помола \bar{d} . С этой целью упростим интегральное выражение, представив его конечной суммой:

$$P_{P3} = \alpha_H \sum_{i=1}^k \left(1 - \frac{d}{d_{BK}}\right) \left(\exp\left(-\frac{d_{i+1}}{d}\right) - \exp\left(-\frac{d_i}{d}\right)\right).$$

С целью возможности выполнения аналитических расчетов примем закон распределения частиц по крупности однопараметрическим.

Задавая значениями средней крупности помола и вычисляя количество открытых рудных зерен, путем сравнения его с необходимым вычисленным ранее определим необходимую крупность помола руды. Приняв значение средней крупности вкрапления $d_{BK} = 0,2$ мм было получено:

- для $\bar{d} = 0,2$, $P_{P3} = 0,13$;
- для $\bar{d} = 0,1$, $P_{P3} = 0,27$;
- для $\bar{d} = 0,03$, $P_{P3} = 0,33$.

Последнее значение содержания открытых рудных зерен соответствует решению задачи.

Таким образом, требуемая средняя крупность помола руды составляет $d_{K3} = 0,03$ мм. При этом содержание класса $-0,07$ мм, составляет

Загальні питання технології збагачення

$$P_{-0,07} = 1 - \exp\left(-\frac{0,07}{0,03}\right) = 0,903.$$

Следовательно, для получения требуемых показателей качества концентрата необходимо измельчать руду, в которой содержание ценного компонента 40% и вкрапление его 0,2 мм до 90% класса – 0,07 мм, что соответствует показателям измельчения для железной руды средней обогатимости.

Известно, что технологические линии обогащения (ТЛО) железных руд построены по стадийному принципу и в каждой стадии выделяют только хвосты [1]. Обогащенный продукт представляет собой промежуточный продукт (промпродукт) и направляется на дообогащение в последующую стадию.

Известно также [1], что изменение обогатительных признаков исходной руды приводит к существенному изменению показателей обогащения вдоль всей технологической линии обогащения руды. Таким образом, при возникновении отклонения входных показателей качества сырья, необходимо произвести перенастройку режимных параметров обогатительной технологии, с тем, чтобы качество концентрата и промежуточных продуктов β_{IIIj} оставались на прежних уровнях. Отсюда следует, что значения величин β_{IIIj} должны быть определены и соответствовать определенным значениям обогатительных признаков.

На кафедре обогащения полезных ископаемых Национального горного университета разработаны все необходимые для решения поставленной задачи математические модели. Однако общего алгоритма решения не было найдено. В данной работе предлагается такой общий алгоритм, который дает возможность вычислить β_{IIIj} , как функцию:

$$\beta_{IIIj} = f(a_{ib}, d_{BK}, \text{измельчаемость}).$$

А если принять обогатительные признаки некоторыми усредненными, то это будет общим решением задачи с целью определения раскрытия в каждой стадии обогащения.

Первая подзадача предполагает определение требуемой крупности помола руды d_{K3} для достижения заданного качества концентрата. Алгоритм решения этой задачи изложен выше, а кратность измельчения составит:

$$n = \frac{d_{II}}{d_{K3}}.$$

Вторая подзадача предполагает определение требуемых крупностей помола в соответствующих стадиях обогащения. Для этого, в соответствии с технологическими характеристиками измельчительных аппаратов и агрегатов определяют кратности измельчения i_j в каждой стадии помола j , которая может быть изменена подстройкой режимных параметров аппаратов измельчения. При этом:

$$i_1 \times i_2 \times \dots \times i_k = n. \tag{12}$$

Отсюда требуемая крупность помола в каждой стадии обогащения составит:

$$d_1 = \frac{d_{II}}{i_1}, \quad d_2 = \frac{d_1}{i_2}, \quad d_{k-1} = \frac{d_{k-2}}{i_{k-1}}.$$

Третья подзадача заключается в определении раскрытия ценного минерала в каждой из стадий обогащения. Идентифицировать функцию распределения частиц по крупности $f(d)$ на основании одного параметра – средней крупности помола d_j ; возможно, если это распределение подчиняется закону Пуассона

$$f_j(d) = \frac{1}{d_j} \exp\left(-\frac{d}{d_j}\right). \tag{13}$$

Крупность помола в ТЛЮ тонковкрапленных железных руд весьма мала (содержание класса – 0,05 мм < 95%) и поэтому можно предположить, что $d_j \rightarrow 0$, и на этом основании полагать, без натяжек, что распределение частиц по крупности во всех стадиях измельчения пуассоновское.

Показатели раскрытия и функция распределения сростков в первой стадии измельчения $F_1(\alpha)$ может быть найдена на основании работы [2]. А так как нами рассматривается уже существующая технология, то известной является схема сепарации, а значит и сепарационная характеристика $P_1(\alpha)$ разделительного блока. В результате, на основании работы [3] несложно определить качественно-количественные показатели разделения: выход промпродукта $\gamma_{ПП1}$ и содержание ценного минерала в нем $\beta_{ПП1}$, а также потери в хвостах – v_1 .

Четвертая подзадача заключается в определении показателей раскрытия во второй и последующих стадиях обогащения. В работе [3] изложен алгоритм вычисления $F_j(\alpha)$ для условий, когда первоначальная структура руды разрушена, и размер вкрапления определяется размером рудной части в сростках, поступающих на измельчение. Поэтому на основании функций $F_j(\alpha)$ и $P_j(\alpha)$ могут быть найдены $\beta_{ППj}$ и β_K .

В соответствии с техническими условиями для качества концентрата имеется нижний допустимый предел β_{KMIN} . В соответствии с этим значением существуют и такие же пределы для промпродуктов:

$$\beta_{ППMIN1}, \beta_{ППMIN2}, \dots, \beta_{ППMIN(n-1)}.$$

Эти пределы показывают такие значения качества промпродуктов, при которых качество концентрата не выйдет за нижний допустимый предел.

Поиск минимально-допустимых значений качества промпродуктов осуществляется по ранее изложенному алгоритму, начиная с первого пункта, когда

Загальні питання технології збагачення

находят требуемую крупность помола. В этом случае это будут максимально допустимые крупности помола.

В обогатительной практике для получения достаточных показателей качества сырья применяется многократное разделение уже обогащенного продукта. А для получения максимального количества такого продукта выполняют после разделения дополнительную подготовку. Нераскрытый продукт направляют в последующие переделы.

Рассмотрим аспект выделения открытых фракций с иной стороны, т.е. с точки зрения возможного приращения качества и выхода концентрата.

Основной характеристикой смеси, подготовленных к разделению частиц, является функция распределения $F(x)$ этих частиц по разделительному признаку x – размеру частиц, магнитной восприимчивости, плотности и т.д. Все эти признаки имеют тесную корреляционную связь с содержанием ценного минерала – α_{II} . Следовательно $F(x) \equiv F(\alpha)$. Эта функция есть общая характеристика подготовки сырья. В практике обогащения полезных ископаемых она называется кривой обогатимости. Одно из свойств такой функции то, что она – неубывающая (рис. 1) и в зависимости от подготовки сырья смесь частиц имеет функцию $F(x)$ различного вида. отождествим разделительный признак с содержанием ценного компонента, т.е. $\alpha \equiv x$, которое изменяется в пределах $0 < \alpha < 1$. Так, при хорошей подготовке смесь имеет незначительное количество промежуточных фракций и состоит в основном из раскрытых частиц ценного и неценного компонентов руды (кривая 1). Соотношение между количеством сростков и открытыми фракциями характеризуют понятием – раскрытие (показатель R). Поэтому для данной кривой $R \rightarrow 1$, и $F(\alpha)$ практически не зависит от α . Разрывы первого рода в точках 0 и 1 дают отрезки, определяющие количество открытых частиц с нулевым разделительным признаком ($\alpha = 0$) и с максимальным ($\alpha = 1$). Вид кривой 2 позволяет сделать вывод, что диапазон изменения свойств частиц весьма узок и осуществлять разделение не имеет смысла: все частицы представлены одинаковыми разделительными свойствами. Т.е. в этом случае раскрытие $R \rightarrow 0$, – открытых фракций нет, а все сростки имеют одинаковое содержание ценного минерала, равное среднему, что существует в неподготовленном сырье. Кривая 3 на рис. 1 представляет собой общий вид функции подготовки.

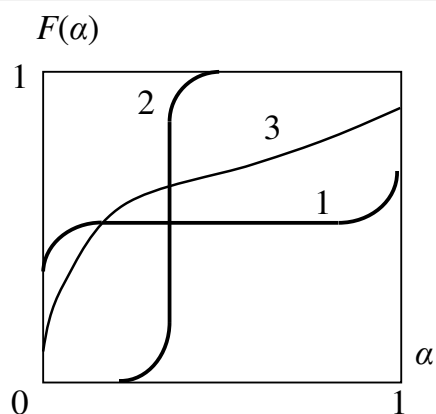


Рис. 1. Графики функции распределения сродков при крайних случаях раскрытия

Разделительный аппарат обычно обладает таким естественным свойством, что частицы с большим значением разделительного признака имеют большую вероятность извлечения в обогащенный продукт. Это и отражается сепарационной характеристикой, что приведена на рис. 2, и показывает способность аппарата определенным образом разделять подготовленное сырье.

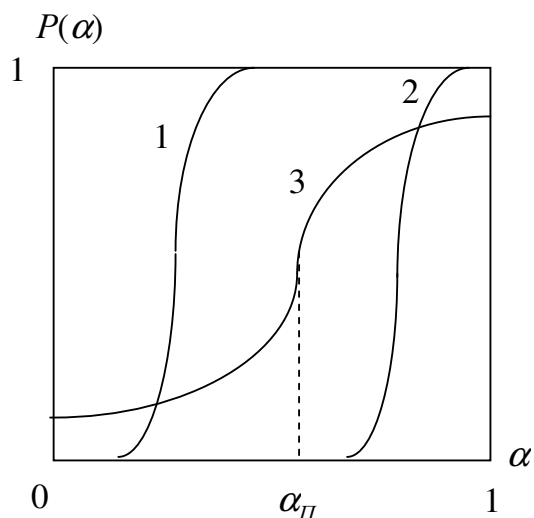


Рис. 2. Виды разделительных характеристик аппаратов

Кривые 1 и 2 (рис. 2) соответствуют аппаратам с хорошими разделительными свойствами. В случае 1 аппарат настроен на выделение бедных частиц, а в случае 2 – богатых. Кривая 3 характеризует разделительный аппарат, в котором обогащенный и обедненный продукты будут иметь частицы всего диапазона разделительных свойств. Путем подстройки режимных и конструктивных параметров этого аппарата, а также созданием технологических блоков можно воздействовать на крутизну кривой сепарационной характеристики $P(\alpha)$ и положение точки перегиба α_{Π} в теоретически неограниченных интервалах значений α . Таким образом, мы вправе предполагать любое необходимое положение

Загальні питання технології збагачення

$P(\alpha)$. Зная сепарационную характеристику $P(\alpha)$ и дифференциальную функцию распределения частиц по разделительному признаку $f(\alpha) = \frac{\partial F(\alpha)}{\partial \alpha}$, несложно определить показатели разделения: качество обогащенного (β) и обедненного продуктов (ν) соответственно составят:

$$\beta = \frac{\int_0^1 \alpha f(\alpha) P(\alpha) d\alpha}{\int_0^1 f(\alpha) P(\alpha) d\alpha} ; \quad \nu = \frac{\int_0^1 \alpha f(\alpha) (1 - P(\alpha)) d\alpha}{\int_0^1 f(\alpha) (1 - P(\alpha)) d\alpha} . \quad (14)$$

Теперь есть все необходимые сведения, чтобы провести численное экспериментирование по изучению закономерностей изменения качества концентрата и потерь в хвостах некоторой обобщенной технологической линии.

Возьмем характеристику $P(\alpha)$ (вида 1, рис. 2) и будем изменять величину α_{II} , т.е. смещать сепарационную характеристику, от 0 до 1. В результате моделирования при $R = \text{const}$ ($R > 0,5$, что соответствует кривой 3, рис. 1) получены зависимости $\beta = f_1(\alpha_{II})$ и $\nu = f(\alpha_{II})$, которые представлены на рис. 3.

Как видно из рис. 3, существует функциональная зависимость между выходными показателями разделения $\beta = f(\nu)$ (рис. 4).

Эти зависимости изменяют свою кривизну в зависимости от раскрытия рудной фазы. Чем выше раскрытие ценного минерала, тем кривизна больше и отрицательная. И при $R \rightarrow 1$ кривая вырождается в ступенчатую функцию в точке (0,1). При уменьшении раскрытия от $R = 0,5$ кривизна зависимости $\beta = f(\nu)$ становится положительной и при $R \rightarrow 0$ функция вырождается точку с координатами $(\alpha_{II}, \alpha_{II})$.

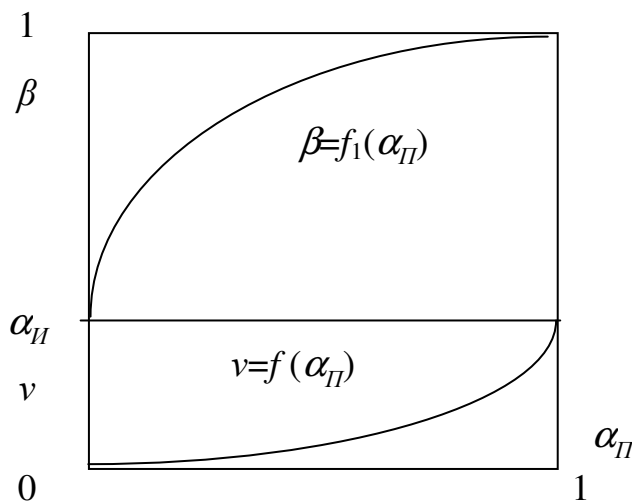


Рис. 3. Графики изменения показателей разделения при смещении точки перегиба разделительной характеристики

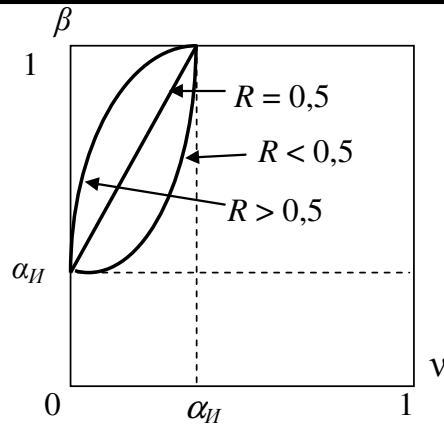


Рис. 4. Зависимость выходных показателей бинарного разделения друг от друга

Рассмотрим закономерности разделения, когда сепарационная характеристика $P(\alpha)$ имеет вид кривой 3 (рис. 2), а раскрытие $R \rightarrow 1$. При этом никогда не будет получено разделение, которое считается идеальным и всегда $\beta < 1$ и $\nu > 0$. Зависимости $\beta = f_1(\alpha_H)$ и $\nu = f_2(\alpha_H)$ будут иметь предельные значения выходных показателей разделения измененных на следующие величины:

$$\Delta\beta = 1 - \frac{P_{P3}P(1)}{P_{P3}P(1) + P_{H3}P(0)}; \quad \Delta\nu = \frac{(1-P(1))P_{P3}}{(1-P(1))P_{P3} + P_{H3}(1-P(0))}.$$

При изменении раскрытия в области, где $R < 0,5$, функции f_1 и f_2 изменяют знак кривизны. Как видно, частицы имеют минимальное значение разделительного признака при $\alpha_{\min} \rightarrow 0$, а максимальное – при $\alpha_{\max} \rightarrow 1$.

Проведенные рассуждения дают возможность заключить, что в случае бинарного разделения в одном аппарате невозможно получить одновременно богатый обогащенный продукт и бедные хвосты. Для такого противоречивого требования необходимо технологическое решение или изменение раскрытия. Таким технологическим решением может быть схема, показанная на рис. 5, в которой аппараты для выделения концентрата имеют сепарационную характеристику вида 2 (рис. 2), а для выделения хвостов – вида 1 (рис. 2).

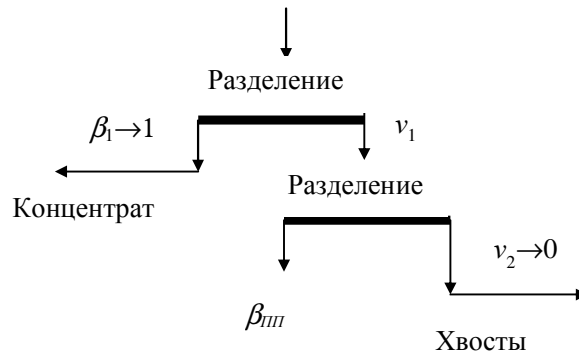


Рис. 5. Схема одновременного выделения концентрата и хвостов

Загальні питання технології збагачення

Выразим показатели раскрытия через один аргумент $0 \leq R \leq 1$. С его помощью содержание фракций в подготовленном продукте можно выразить как:

- открытые рудные зерна $P_{P3} = \alpha_{II} \cdot R$;
- богатые сростки $P_{PC} = \alpha_{II} \cdot (1 - R)$;
- бедные сростки $P_{HC} = (1 - \alpha_{II}) \cdot (1 - R)$.

Если минерал полностью раскрыт ($R=1$), то будут только открытые зерна среди частиц, если же минерал не раскрыт ($R=0$), то будут сростки в количестве

$$P_{PC} = \alpha_{II}, \quad P_{HC} = 1 - \alpha_{II},$$

что соответствует представлению о раскрытии рудного минерала.

Подставим показатели раскрытия в формулу, позволяющую определить качество промежуточного продукта, и будем иметь:

$$\begin{aligned} \beta_{III} &= \frac{P_{PC}\alpha_{PC} + \alpha_{HC}P_{HC}}{P_{PC} + P_{HC}} = \frac{\alpha_{II}(1-R)\frac{1+\alpha_{II}}{2} + (1-\alpha_{II})(1-R)\frac{\alpha_{II}}{2}}{\alpha_{II}(1-R) + (1-\alpha_{II})(1-R)} = \\ &= \frac{\alpha_{II} + \alpha_{II}^2 + \alpha_{II} - \alpha_{II}^2}{2(\alpha_{II} + 1 - \alpha_{II})} = \frac{2\alpha_{II}}{2} = \alpha_{II}. \end{aligned}$$

Таким образом, при стадийном выделении открытого минерала исходное содержание ценного компонента по стадиям подготовки неизменно и равно исходному содержанию. При этом раскрытие исходного сырья для каждой последующей стадии должно быть $R > 0,5$.

Чем тоньше продукт, тем сложнее его раскрытие и приращение содержания открытых фракций будет все время уменьшаться, следовательно, выход концентрата по каждой последующей стадии будет уменьшаться, и стремиться к нулю: $\Delta y \rightarrow 0$ (при всех прочих равных условиях).

Если же не выделять концентрат в каждой стадии, то выход от стадии к стадии будет увеличиваться, но приращение выхода – уменьшаться, поскольку размеры сростков будут все время уменьшаться, а значит и раскрытие ценного минерала будет все более затрудняться.

Построим функцию $\beta = f(v)$ при исходном значении содержания ценного минерала α_{II} . Отложим по оси абсцисс на рис. 6 значение V_{don} и проведем вертикаль. Точка пересечения этой вертикали с кривой $\beta = f(v)$ дает значение качества обогащенного продукта, которое достижимо при принятой технологии $\beta = \beta_{III}$.

Если же применять сепараторы только с одинаковыми сепарационными характеристиками, то технология будет реализовывать стадийное выделение только одного вида готового продукта: хвостов или концентрата.

Предположим, что мы располагаем одним видом сепараторов, которые имеют сепарационные характеристики вида 1 (рис. 1). В этом случае выделяем

Загальні питання технології збагачення

только хвосты. Расчеты по формулам (1) показывает, что за 2...3 приема разделения можно получить практически чистые хвосты. Весь обогащенный продукт идет на дальнейшее раскрытие для более глубокого обогащения.

Зависимость $\beta = f(v)$ изображаем прямыми линиями (рис. 6), потому что раскрытие, несущественно отличается от $R > 0,5$ и по мере увеличения качества концентрата, уменьшается.

Следующая стадия обогащения имеет исходное содержание подготовленного сырья $\alpha_{II} = \beta_{II1}$ и даст максимальное значение качества β_{III2} , и т.д.

Обогатительный процесс прекращают тогда, когда эти приращения станут несущественными. А несущественное приращение соответствует попаданию их в интервал погрешности, т.е. если взять продукт с качеством α_{II} и смешать его с продуктом, качество которого $\beta_k = 1$, то получим продукт не хуже заданного качества β_{k3} . Допустим, проведено n стадий подготовки и разделения ценного минерала. В каждой стадии было получено P_{P3_i} открытых рудных зерен и P_{H3_i} нерудных зерен. Тогда при смешении получим продукт с качеством

$$\beta = \frac{\sum_{i=1}^n P_{P3_i} + (1 - P_{P3_i} - P_{H3_i})\alpha_{II}}{\sum_{i=1}^n P_{P3_i} + 1 - P_{P3_i} - P_{H3_i}}.$$

Следовательно, единичного показателя качества концентрата при таком способе построения технологии недостижимо.

Рассмотрим закономерности разделения схемы, изображенной на рис. 5 в соответствии с методикой, соответствующей построениям рис. 6.

Предположим, что распределение сростков имеет вид, показанный в табл. 3

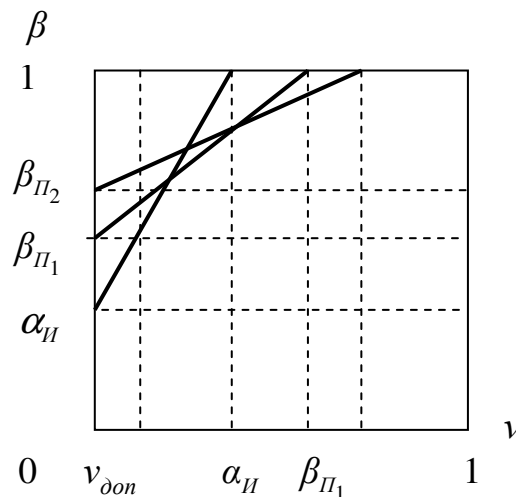


Рис. 6. Схема для определения выходных показателей технологических блоков подготовки и разделения

Функция распределения сростков				
α , содержание ценного минерала, д. ед.	1,0	0,65	0,15	0,0
P , содержание фракций в смеси, д.ед	0,1	0,2	0,55	0,15

На показатели качества концентрата также наложено ограничение, $\beta_k \geq \beta_{Пдон}$.

При выделении концентрата промежуточный продукт после первого приема составит (рис. 7)
$$\beta_{П2} = \frac{0,65 \times 0,2 + 0,15 \times 0,55}{0,9} = 0,236.$$

Построения, соответствуют кривой 1 на рис. 7.

Далее на второй прием идет продукт с качеством $\beta_{П1}$. Выполняем построения для показателей разделения (кривая 2, рис. 7) при условии, что потери в хвостах тоже имеют ограничения $v \leq v_{дон}$.

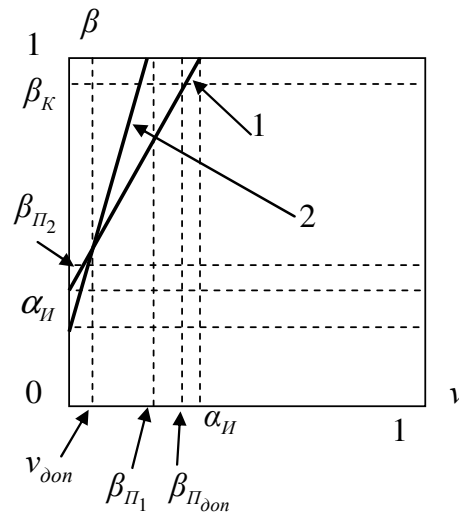


Рис. 7. Схема для определения выходных показателей технологических блоков подготовки и разделения

В результате качество промпродукта (в пределах погрешности построения) получается $\beta_{П2} \approx \alpha_n$,

Если же первоначально выделять хвосты, то схема определения показателей разделения выглядит аналогично и представлена на рис. 8.

При выделении хвостов, качество промежуточного продукта составит:

$$\beta_{П1} = \frac{0,1 + 0,65 \times 0,2 + 0,15 \times 0,55}{0,85} = 0,367.$$

В соответствии с построениями кривой 2 (рис. 8) видно, что качество обедненного (промежуточного) продукта соответствует первоначальному исходному содержанию $\beta_{П1} \approx \alpha_n$,

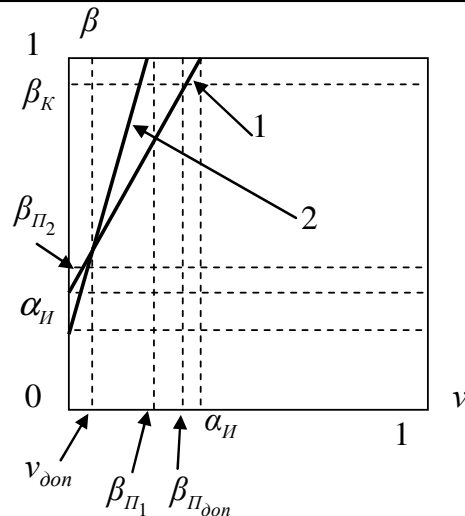


Рис. 8. Схема для определения выходных показателей технологических блоков подготовки и разделения

Таким образом, не имеет значения, что выделять первоначально: хвосты или концентрат при выделении промежуточного продукта, т.к. его качество соответствует исходному содержанию. В случае стадийного выделения открытых фракций производительность по промежуточному продукту будет все время уменьшаться от стадии к стадии. При условии, что расход воды на обогатительный процесс будет неизменным, то разделение будет проходить при снижении содержания твердого в пульпе p_T , поступающей на разделение. По этой причине возможно снижение захвата нерудной фазы в концентрат, т.к.

$$p_{зах} = P_M (1 - P_M) p_T.$$

Поскольку P_M при снижении приращения раскрытия практически остается неизменным и приближается к 1 (бедная и богатая фракции практически одинаково флокулируют), то не имеет значения с этой точки зрения выделять или нет из обогащенного продукта открытую рудную фракцию.

Выводы

Поскольку мельницы, последующие за первой стадией, приспособлены для более интенсивного измельчения, то можно добиться, достаточного раскрытия во второй и последующих стадиях обогащения

Таким образом, учитывая все приведенные рассуждения, приходим к выводу, что стадийное выделение открытых фракций дает возможность за меньшее количество подготовительных операций получить требуемое высокое качество концентрата при ограничениях на потери в хвостах.

Список литературы

1. Кармазин В.И. Современные методы обогащения руд черных металлов. – М.: Госгортехиздат, 1964. – 763 с.

Загальні питання технології збагачення

2. Марюта А.Н. Автоматическая оптимизация технологических режимов на магнито-обогажительных фабриках. – М.: Недра, 1976. – 287 с.
3. Младецкий И.К., Мостыка Ю.С. Аналитическое определение показателей раскрытия руд. – Днепропетровск: Системные технологии, 1999, – 106 с.
4. Кармазин В.В., Младецкий И.К., Пилов П.И. Расчеты технологических показателей обогащения полезных ископаемых: Учебное пособие – М.: Изд-во Московского государственного горного университета, 2006. – 221 с.
5. Младецкий И.К., Павленко А.А. Определение требуемой крупности помола руды // Збагачення корисних копалин: Наук.-техн. зб. – 2008. – Вип. 35(76). – С.53-57.

© Младецкий И.К., Левченко К.А., Чвилева А.Н., 2015

*Надійшла до редколегії 12.02.2015 р.
Рекомендовано до публікації д.т.н. П.І. Піловим*