

УДК 622.7

**И.К. МЛАДЕЦКИЙ**, д-р техн. наук,

**К.А. ЛЕВЧЕНКО**, канд. техн. наук

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

## **СТАДИАЛЬНОЕ ВЫДЕЛЕНИЕ ОТКРЫТЫХ ФРАКЦИЙ ПРИ ОБОГАЩЕНИИ ПОЛЕЗНЫХ ИСКОПАЕМЫХ**

*Постановка задачи.* В обогатительной практике для получения достаточных показателей качества сырья применяется многократное разделение уже обогащенного продукта (контрольные и перечистные операции). А для получения максимального количества такого продукта выполняют после разделения дополнительную подготовку. Эти очевидные действия нашли обобщение в принципе Чечетта "не измельчать ничего лишнего". Это значит, что предварительно выполняют некоторую разумную подготовку, затем выделяют открытые фракции. Нераскрытый продукт направляют на последующую подготовку.

Что значит "разумная подготовка"? Это значит, что в материале уже появилось достаточное количество открытых фракций. А что значит "достаточное количество"? Количественно это понятие устанавливается из экономических соображений, когда затраты на выделение открытых фракций меньше чем возможная прибыль предприятия от реализации концентрата. Т.е. себестоимость концентрата настолько мала, что позволяет предприятию развиваться. Будем в дальнейшем полагать, что понятие "достаточности" каким-то образом обосновано.

На магнитообогатительных фабриках открытую нерудную фракцию выделяют в виде хвостов, т.е. когда ожидаемые потери удовлетворяют промышленным кондициям, а открытую рудную фракцию не выделяют, а вместе со сростками направляют на дальнейшую подготовку. Это влечет за собой непроизводительные затраты, но обогатители идут на это, т.к. выделение открытой рудной фазы обойдется, как они считают, еще дороже. Рассмотрим аспект выделения открытых фракций с иной стороны, т.е. с точки зрения возможного приращения качества и выхода концентрата.

*Решение задачи.* Основной характеристикой смеси частиц, подготовленных к разделению, является функция распределения  $F(x)$  этих частиц по разделительному признаку  $x$ , который может иметь одно из следующих физических свойств: размер частиц, магнитную восприимчивости, плотность и т.д. Все эти признаки имеют тесную корреляционную связь с содержанием ценного минерала –  $\alpha_{и}$ . 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 различные виды функции  $F(x)$ . отождествим разделительный признак с содержа-

## Загальні питання технологій збагачення

нием ценного компонента, т.е.  $\alpha \equiv x$ , которое изменяется в пределах  $0 < \alpha < 1$ . Так, при хорошей подготовке смесь имеет незначительное количество промежуточных фракций (кривая 1). Разрывы первого рода в точках 0 и 1 указывают на количественное содержание открытых частиц с нулевым разделительным признаком (породные,  $\alpha = 0$ ) и с максимальным – рудные ( $\alpha = 1$ ). Промежуточные фракции представлены сростками, которые состоят из рудной и нерудной фаз. 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. Кривая 3 представляет собой общий вид функции распределения сростков, после подготовки сырья к разделению.

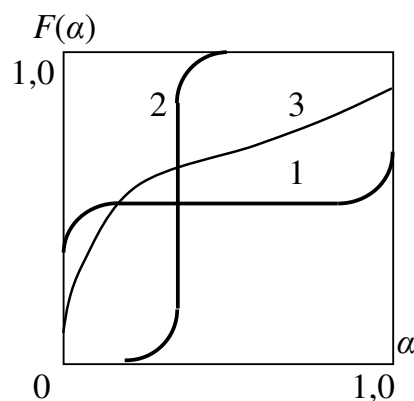


Рис. 1. Вид функции распределения сростков при различных случаях раскрытия

Соотношение между количеством сростков и открытыми фракциями характеризуют понятием – раскрытие. Так, когда раскрытие  $R = 0$ , – открытых фракций нет, а все сростки имеют одинаковое содержание ценного минерала, равное среднему. Это указывает на то, что сырье не подготовлено к дальнейшему разделению. При этом  $F(\alpha)$  имеет вид ступенчатой функции и частицы будут с одинаковыми значениями содержания ценного компонента (кривая 2). Когда  $R \rightarrow 1$ , т.е. имеем смесь, состоящую из раскрытых частиц ценного и неценного компонентов руды и вид изменения  $F(\alpha)$  соответствует кривой 1.

Разделительный аппарат обычно обладает таким естественным свойством, что частицы с большим значением разделительного признака имеют большую вероятность извлечения в обогащенный продукт. Это и отражается в разделительной характеристике  $P(\alpha)$  обогатительного аппарата, которая представлена на рис. 2, и показывает способность аппарата определенным образом разделять подготовленное сырье.

Кривые 1 и 2 (рис. 2) соответствуют аппаратам с хорошими разделительными свойствами. В первом случае аппарат настроен на выделение бедных частиц, а во втором – богатых. Кривая 3 (рис. 2) характеризует разделительный ап-

парат, в котром обогаченный 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, как на крутизну кривой  $P(\alpha)$ , так и на положение точки перегиба  $\alpha_{II}$  в практически неограниченных интервалах значений  $\alpha$ . Таким образом, мы вправе предполагать любое необходимое положение  $P(\alpha)$ . Зная разделительную характеристики  $P(\alpha)$  и дифференциальную функцию распределения частиц по разделительному признаку  $f(\alpha) = \frac{\partial F(\alpha)}{\partial \alpha}$ , несложно определить выходные показатели разделения: качество обогаченного и обедненного продуктов соответственно:

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

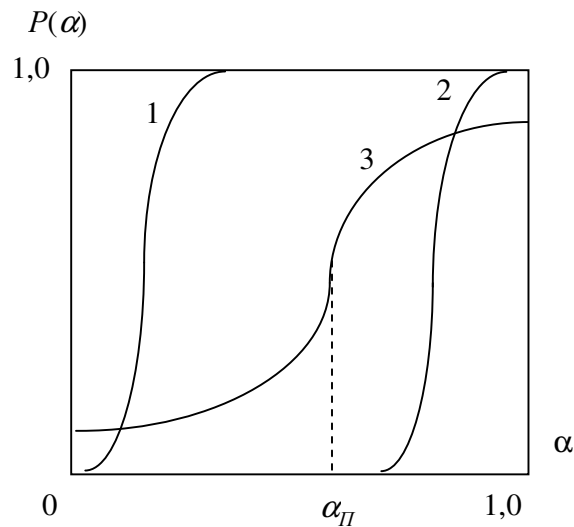


Рис. 2. Виды разделительных характеристик аппаратов

Оба показателя изменяются в одном и том же направлении: если абсцисса точки перегиба  $\alpha_{II}$  на кривой разделения смещается, например, вправо, то увеличиваются  $\beta$  и  $\nu$ . При смещении влево – качество продуктов разделения уменьшаются.

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  $\alpha_{II}$  от 0 до 1,0. В результате моделирования при  $R = const$  ( $R > 0,5$ ) (кривая 3,

## Загальні питання технологій збагачення

рис. 1) будут получены зависимости  $\beta = f_1(\alpha_{II})$  и  $v = f_2(\alpha_{II})$ , представлены на рис. 3.

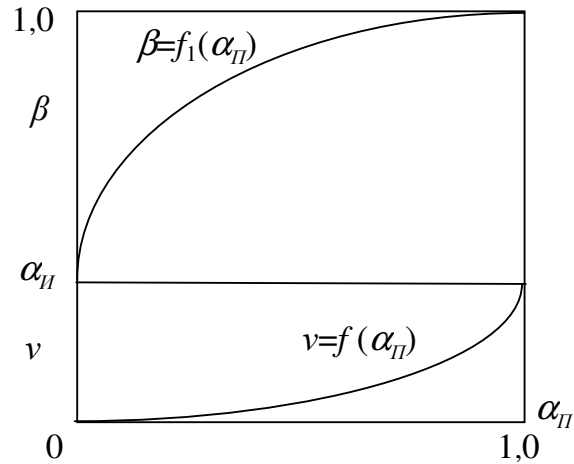


Рис. 3. Графики изменения показателей разделения при смещении точки перегиба разделительной характеристики

Как видно из рис. 3, существует функциональная зависимость между содержанием ценного компонента в продуктах разделения (концентрате и отходах)  $\beta = f(v)$  (рис. 4).

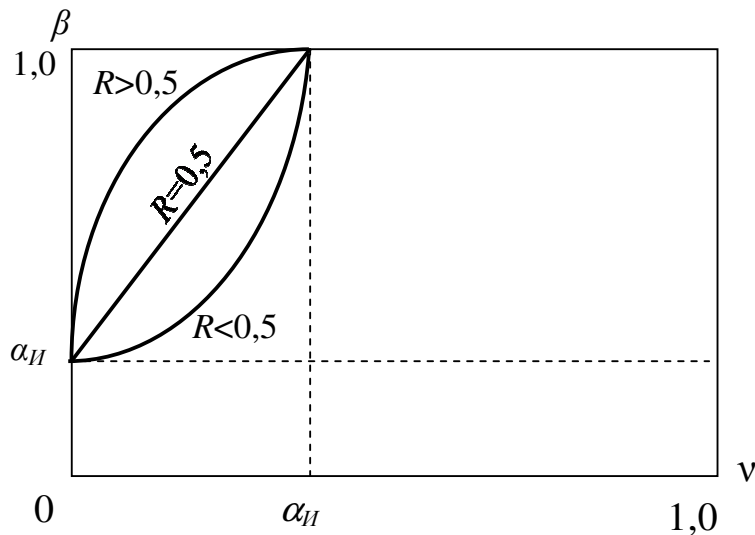


Рис. 4. Зависимость содержания ценного компонента в продуктах разделения друг от друга при бинарном разделении

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  $(0; 1,0)$ . При уменьшении раскрытия от  $R = 0,5$  кривизна зависимости

$\beta = f(v)$  становиться положительной и при  $R \rightarrow 0$  функция вырождается точку с координатами  $(\alpha_{II}, \alpha_{II})$ .

Рассмотрим закономерности разделения, когда сепарационная характеристика 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  $v > 0$ . Зависимости  $\beta = f_1(\alpha_{II})$  и  $v = f_2(\alpha_{II})$  будут иметь предельные значения выходных показателей разделения измененных на следующие величины:

$$\beta = \frac{\Delta F_{P3}P(1)}{\Delta F_{P3}P(1) + \Delta F_{H3}P(0)}; \quad v = \frac{(1-P(1))\Delta F_{P3}}{(1-P(1))\Delta F_{P3} + \Delta F_{H3}(1-P(0))},$$

где  $\Delta F$  – соответственно количество рудных и нерудных частиц;  $P(1)$  – вероятность извлечения рудных частиц ( $\alpha = 1$ ) в обогащенный продукт;  $P(0)$  – вероятность извлечения породных частиц ( $\alpha = 0$ ) в обогащенный продукт.

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 (если при  $R \rightarrow 1$  мы не получаем предельные показатели обогащения величины  $\beta$  и  $v$ , то остается только первое). Таким технологическим решением может быть схема, показанная на рис. 5, в которой аппараты для выделения концентрата (первая операция разделения) имеют сепарационную характеристику вида 2 (рис. 2), а для выделения хвостов (вторая операция) – вида 1 (рис. 2).

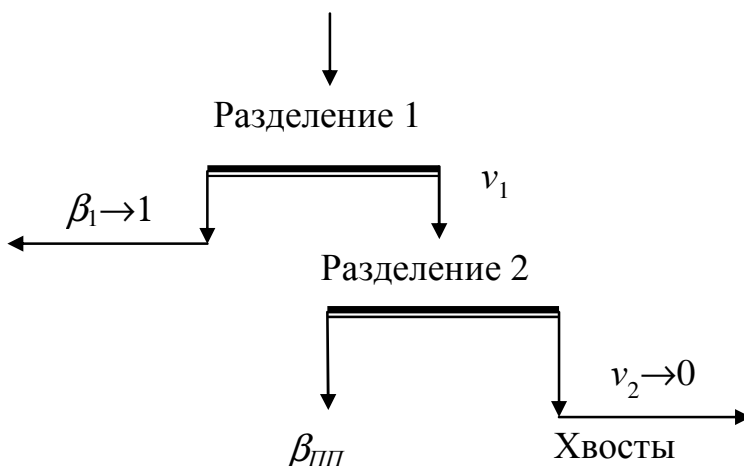


Рис. 5. Схема одновременного выделения концентрата и хвостов

Выразим количество рудных, породных частиц, богатых и бедных сростков через показатель раскрытия, изменяющийся в пределах  $0 \leq R \leq 1$ . Тогда содержание фракций в подготовленном продукте можно выразить как:

## **Загальні питання технологій збагачення**

- открытые рудные зерна  $P_{PЗ} = \alpha_{II} R$ ;
- открытые нерудные зерна  $P_{НЗ} = (1 - \alpha_{II}) R$ ;
- богатые сростки  $P_{РС} = \alpha_{II} (1 - R)$ ;
- бедные сростки  $P_{НС} = (1 - \alpha_{II})(1 - R)$ .

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

$$P_{РС} = \alpha_{II}, \quad P_{НС} = 1 - \alpha_{II}$$

что соответствует представлению о раскрытии рудного минерала.

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

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

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

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

Если же применять сепараторы только с одинаковыми сепарационными характеристиками, то технология будет реализовывать стадийное выделение только одного вида готового продукта: хвостов или концентрата. При этом на конечные продукты разделения всегда накладывается ограничения, а именно: на потери ценного минерала в хвостах  $v \leq v_{дон}$  (допустимые потери) и на содержание ценного минерала в концентрате  $\beta_k \geq \beta_{кз}$ .

Предположим, что мы располагаем одним видом сепараторов, которые имеют сепарационные характеристики вида 1 (рис. 2). В этом случае выделяем только хвосты. Расчеты по формулам (1) показывают, что за 2-3 приема разделения можно получить практически чистые хвосты. Весь обогащенный продукт идет на дальнейшее раскрытие для более глубокого обогащения.

В этом случае, содержание полезного компонента в промпродукте будет увеличиваться от стадии к стадии, но приращение содержания – снижаться, по-

скільки розміри сростков будут все время уменьшаться, а значит и раскрытие ценного минерала будет все более затруднительным.

Покажем это графически и для наглядности зависимость  $\beta_K = f(v)$  изобразим прямыми линиями (рис. 6). Восстанавливаем вертикаль в точке  $v = v_{дон}$  и в пересечение ее с кривой  $\beta_K = f(v)$  определяем предельное значение качества обогащенного продукта в данной стадии обогащения –  $\beta_{III1}$ . Следующая стадия обогащения даст максимальное значение качества  $\beta_{III2}$ , и т.д.

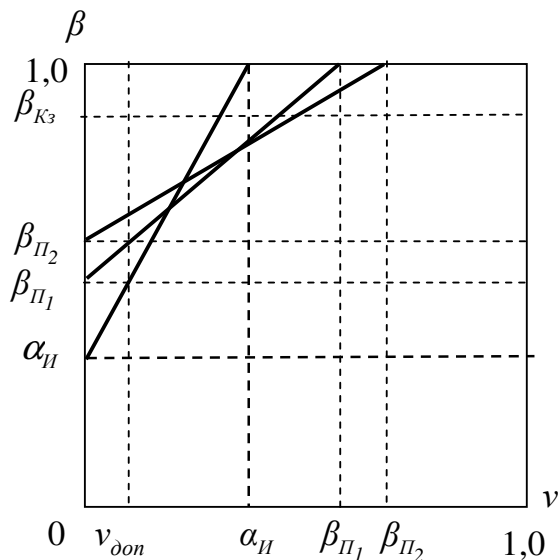


Рис. 6. Схема для определения выходных показателей технологических блоков подготовки и разделения при выделении в каждом блоке отходов

Как видим, приращение качества промежуточного продукта будет от стадии к стадии уменьшаться (рис. 6). Обогачительный процесс прекращают тогда, когда эти приращения станут несущественными, или качество конечного концентрата будет удовлетворять условию  $\beta_{III_n} = \beta_K \geq \beta_{K3}$ .

Приращения считаются несущественными, если попадают в интервал погрешности, т.е. если взять продукт с качеством  $\alpha_{II}$  и смешать его с продуктом, качество которого  $\beta_K = 1$ , то получим продукт не хуже заданного качества  $\beta_{K3}$ . 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

$$\beta_{III_n} = \frac{\sum_{i=1}^n P_{P3_i} + \left(1 - \sum_{i=1}^n (P_{P3_i} + P_{H3_i})\right) \alpha_{II}}{1 - \sum_{i=1}^n P_{H3_i}}$$

## Загальні питання технологій збагачення

Как видим, по мере увеличения качества обогащенного продукта уменьшается приращение его по операциям.

Аналогично, можем произвести графическое построение, если в каждой стадии будет выделяться рудная фаза (концентрат). В этом случае, содержание ценного компонента в промпродукте от стадии к стадии будет уменьшаться (рис. 7).

Как видим (рис. 7), приращение снижения качества, и качество промежуточного продукта будет от стадии к стадии уменьшаться. Обогастительный процесс прекращают тогда, когда эти приращения станут незначительными, или качество конечного концентрата будет удовлетворять условию  $\beta_{III_n} \leq v_{дон}$ .

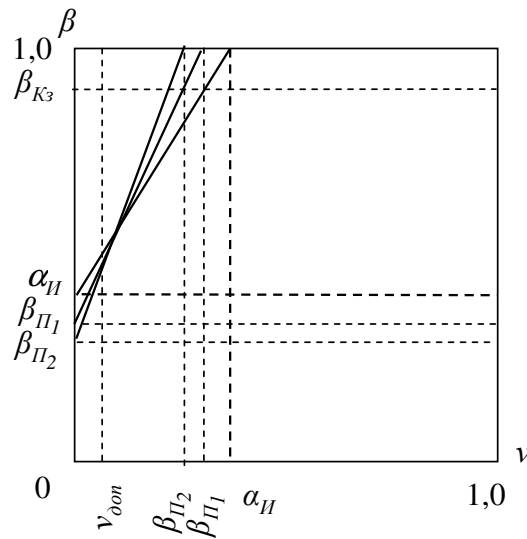


Рис. 7. Схема для определения выходных показателей технологических блоков подготовки и разделения при выделении в каждом блоке концентрата

В случае стадийного выделения открытых фракций производительность по промежуточному продукту будет все время уменьшаться от стадии к стадии. При условии, что расход воды на обогастительный процесс будет неизменным, то разделение будет проходить при снижении содержания твердого в пульпе  $p_T$ , поступающей на разделение. По этой причине возможно частичное снижение захвата нерудной фазы в концентрат, т.к.

$$p_{зах} = P_M (1 - P_M) p_T.$$

где  $p_{зах}$  – вероятность извлечения нерудных частиц в концентрат;  $P_M$  – содержание магнитной фракции;  $p_T$  – содержание твердого в пульпе.

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 літератури**

1. Младецкий И.К., Пилов П.И. Аналитическое определение показателей раскрытия руд: Монография. – Днепропетровск: Системные технологии, 1999. – 106 с.

2. Особенности стадийного выделения концентрата. Синтез структуры разделительных блоков / К.А. Левченко, И.К. Младецкий, В.В Швец, А.Н Чвилева // Збагачення корисних копалин: Наук.-техн. зб. – 2015. – Вип. 60(101). – С. 31-44.

© Младецкий И.К., Левченко К.А., 2016

*Надійшла до редколегії 18.02.2016 р.  
Рекомендована до публікації д.т.н. П.І. Піловим*