

УДК 622.776

И.К. МЛАДЕЦКИЙ, д-р техн. наук,

Я.Г. КУВАЕВ, К.А. ЛЕВЧЕНКО, кандидаты техн. наук,

М.И. ЗАШЛЮК

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

ОБОСНОВАНИЕ МАКСИМИЗАЦИИ ВЫХОДА КОНЦЕНТРАТА ПРИ ОБОГАЩЕНИИ ЖЕЛЕЗНЫХ РУД

В работе [1] показана возможность увеличения выхода угольного концентрата при обогащении угольной массы. Для этого необходимо раздельное обогащение разновидностей, которые составляют шихту. Это положение получило название теоремы Рейнгардта.

Попробуем применить методику Рейнгардта [1] для практики рудного обогащения на основании численного анализа. Поскольку осуществляется теоретический поиск, то примем средние показатели перерабатываемых на ИнГОКе руд для усредненных режимных параметров технологических процессов.

Методика Рейнгардта заключается в следующем.

1. Изучается раскрытие ценного минерала и определяется на этом основании функция распределения сродков $F(\alpha)$.

2. Формируется зависимость качества обогащенного продукта от расположения сепарационной характеристики

$$\beta = f(\alpha_{II}),$$

где α_{II} абсцисса точки перегиба сепарационной характеристики.

Для того, чтобы характеризовать сепарационную характеристику $P(\alpha)$ одной величиной α_{II} , необходимо, чтобы начальные ее координаты были (0, 0), а конечные (1, 1). Задают некоторое множество (например, 5) таких характеристик с $0 < \alpha_{II} < 1$. Затем вычисляют ожидаемое качество обогащенного продукта для каждой сепарационной характеристики.

После чего строят зависимость $\beta = f(\alpha_{II})$ и на этом же рисунке наносят график функции распределения сродков $F(\alpha)$. Пункт 2 выполняют для всех смешиваемых разновидностей (пусть это будут две разновидности одинаково представленные в шихте) и для шихты:

$$\beta = f_1(\alpha_{II}),$$

$$\beta = f_2(\alpha_{II}),$$

$$\beta = f_{III}(\alpha_{II}).$$

Загальні питання технологій збагачення

3. Далее на рисунке, который иллюстрирует показатели разделения шихты выполняют такие графические действия.

Проводят горизонталь из точки с ординатой, соответствующей заданному значению качества концентрата – β_{K3} . Отрезок этой прямой между точками пересечения с $F(\alpha)$ и $\beta = f(\alpha_{II})$ (А, Б) служит мерилем для поиска заданного качества концентрата при разделении разновидностей.

Из точки А опускают вертикаль до пересечения с функцией $F(\alpha)$ (точка С). Ордината этой точки определит выход концентрата (отсчет сверху, т.е. $\gamma = 1 - C$).

4. Далее методика одинакова для всех разновидностей, т.е.:

– определяют функцию раскрытия для отдельных разновидностей $F_i(\alpha)$;

– строят рисунок с кривыми $F_i(\alpha)$ и $\beta = f_i(\alpha_{II})$ для каждой смешиваемой разновидности;

– откладывают отрезок АБ между кривой $\beta = f_i(\alpha_{II})$ и вертикалью $\alpha = 1$.

Точка Б укажет заданное качество концентрата для данной разновидности – β_i . Опускаем из точки А вертикаль до пересечения с $F_i(\alpha)$. Ордината этой точки укажет выход концентрата этой разновидности (отсчет сверху, т.е. $\gamma_i = 1 - C_i$).

5. Смесь концентратов, полученных из отдельных разновидностей дает концентрат заданного качества, а общий выход его составит

$$\gamma = \sum_n \gamma_i P_i.$$

Для количественной оценки выполненных теоретических рассуждений примем смесь рудных разновидностей (руда-1, руда-2, шихта) характерных для карьера ИнГОКа.

Имеются две рудные разновидности с содержанием ценного компонента: в руде-1 – $\alpha_{II1} = 0,4$; в руде-2 – $\alpha_{II2} = 0,25$. Вкрапления ценного минерала в руде-1 – $d_{BK1} = 0,25$ мм, в руде-2 – $d_{BK2} = 0,15$ мм. Руды смешиваются в пропорциях 1:1 и измельчаются до средней крупности $\bar{d} = 0,08$ мм. Заданное качество концентрата – $\beta_{K3} = 0,8$. Среднее содержание ценного минерала в шихте $\bar{\alpha}_{III} = (0,4 + 0,25) / 2 = 0,325$. Средняя вкрапленность в шихте $\bar{d}_{BKIII} = (0,15 + 0,25) / 2 = 0,2$ мм.

Рассчитываем кривые обогатимости в соответствии с методикой, изложенной в работе [4]:

$$P_{P3} = \frac{\alpha_{II}}{\bar{d}} \cdot \int_0^{d_{BK}} \left(1 - \frac{d}{d_{BK}}\right) \cdot \exp\left(-\frac{d}{\bar{d}}\right) \partial d,$$

$$P_{PЗ} = \frac{1 - \alpha_{II}}{d} \int_0^{r_{BK}} \left(1 - \frac{d}{r_{BK}}\right) \cdot \exp\left(-\frac{d}{r_{BK}}\right) \partial d,$$

$$r_{BK} = d_{BK} \cdot \left(\sqrt[3]{\frac{0,67}{\alpha_{II}}} - 1\right).$$

В соответствии с исходными данными функции распределения сростков приведены на: рис. 1 – для руды-1; на рис. 2 – для руды-2 и на рис. 3 – для шихты.

Осуществив моделирование разделения разновидностей и шихты на сепараторах с различными сепарационными характеристиками с целью получения зависимостей качество обогащенного продукта – абсцисса точки перегиба сепарационной характеристики: $\beta = f(\alpha_{II})$. Кривые приведены на соответствующих рисунках 1-3.

$$\gamma = \int_0^1 P(\alpha) \cdot f(\alpha) d\alpha, \quad \beta = \frac{1}{\gamma} \int_0^1 \alpha \cdot P(\alpha) \cdot f(\alpha) d\alpha,$$

$$\nu = \frac{1}{1 - \gamma} \int_0^1 \alpha \cdot (1 - P(\alpha)) \cdot f(\alpha) d\alpha, \quad f(\alpha) = \frac{dF(\alpha)}{d\alpha}.$$

Приступаем к определению требуемых качественно-количественных показателей обогащения рудных разновидностей.

Через точку $0,8 = \beta_{III}$ (рис. 5) проводим горизонталь. Из точки пересечения А горизонтали с кривой $\beta = f(\alpha_{II})$ опускаем перпендикуляр. На оси абсцисс получаем рабочую точку сепарационной характеристики, а из точки пересечения вертикали с кривой обогатимости С, проведя горизонталь, до оси ординат имеем значение выхода концентрата, получаемого из разновидности: $\gamma_{III} = 0,3$.

Аналогично поступаем и со всеми разновидностями, которые образуют шихту.

Для первой рудной разновидности (рис. 1) откладываем горизонтально отрезок АБ (рис. 3) таким образом, чтобы он касался кривой $\beta = f(\alpha_{II})$, получаем отрезок А₁Б₁. Качество концентрата первой разновидности должно быть $0,82 = \beta_1$. Из точки пересечения А₁ горизонтали с кривой $\beta = f(\alpha_{II})$ опускаем перпендикуляр. На оси абсцисс получаем рабочую точку сепарационной характеристики, а из точки пересечения вертикали с кривой обогатимости С₁, проведя горизонталь, до оси ординат имеем значение выхода концентрата, получаемого из разновидности: $\gamma_1 = 0,41$.

Для второй рудной разновидности (рис. 2) откладываем горизонтально отрезок АБ (рис. 2) таким образом, чтобы он касался кривой $\beta = f(\alpha_{II})$, получаем

Загальні питання технологій збагачення

отрезок A_2B_2 . Качество концентрата второй разновидности должно быть $0,79 = \beta_1$. Из точки пересечения A_1 горизонтали с кривой $\beta = f(\alpha_{II})$ опускаем перпендикуляр. На оси абсцисс получаем рабочую точку сепарационной характеристики, а из точки пересечения вертикали с кривой обогатимости C_2 , проводя горизонталь, до оси ординат имеем значение выхода концентрата, получаемого из второй разновидности: $\gamma_1 = 0,24$.

Доля каждой разновидности определена заранее. У нас две разновидности в равных долях, поэтому выход составит

$$\gamma = \frac{0,24 + 0,41}{2} = 0,325,$$

что больше чем 0,3 для шихты.

Таким образом, если для различных рудных разновидностей, которые перерабатывает ГОК будут заданы рабочие точки разделительных аппаратов и требуемое качества концентрата, то после смешения концентратов будет получен общий выход больше, чем при обогащении этих разновидностей при одном и том же значении заданного качества.

Теперь, если концентраты, полученные из отдельного обогащения разновидностей, смешать, то получаем суммарный концентрат качества:

$$\beta_{ш} = \frac{0,82 \cdot 0,41 + 0,79 \cdot 0,23}{0,41 + 0,23}.$$

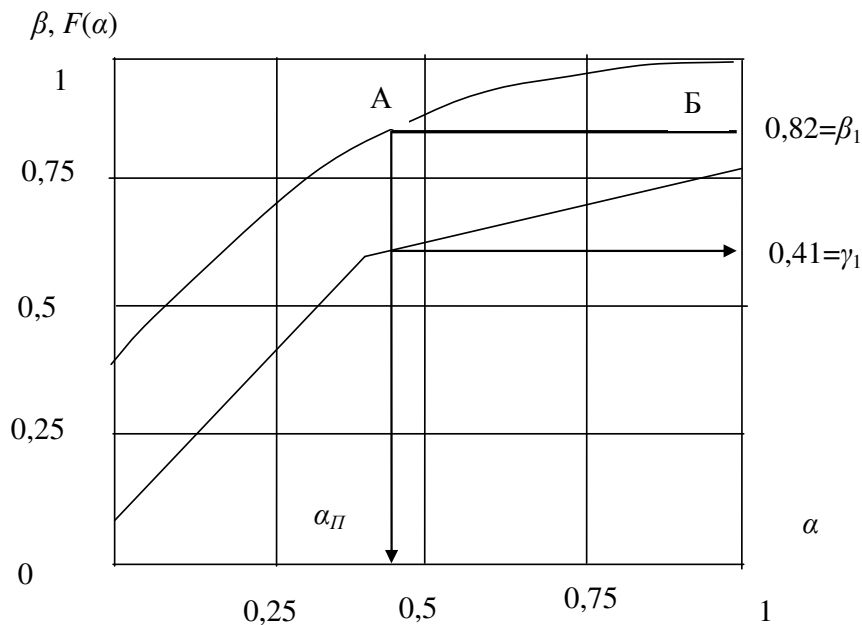


Рис. 1. График для определения качественно-количественных показателей обогащения первой рудной разновидности

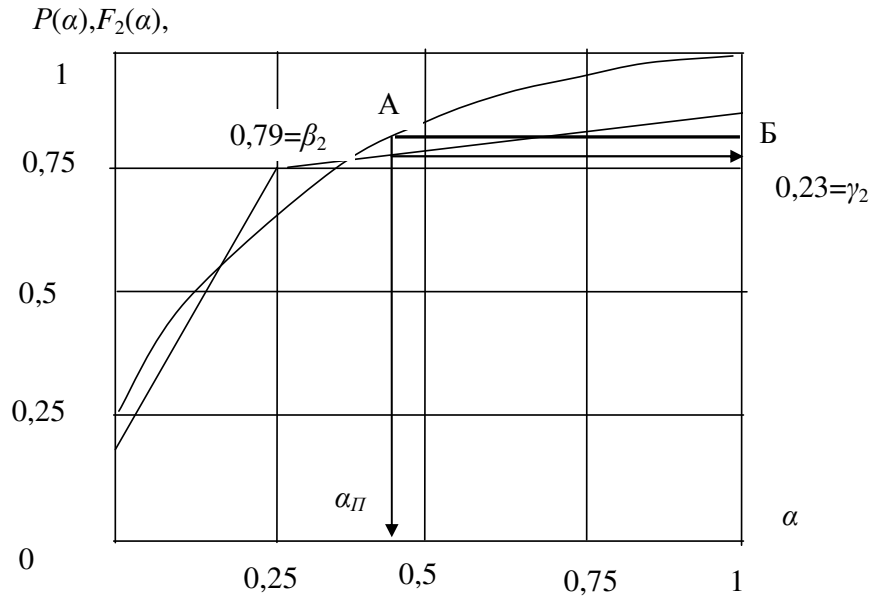


Рис. 2. График для определения качественно-количественных показателей обогащения второй рудной разновидности

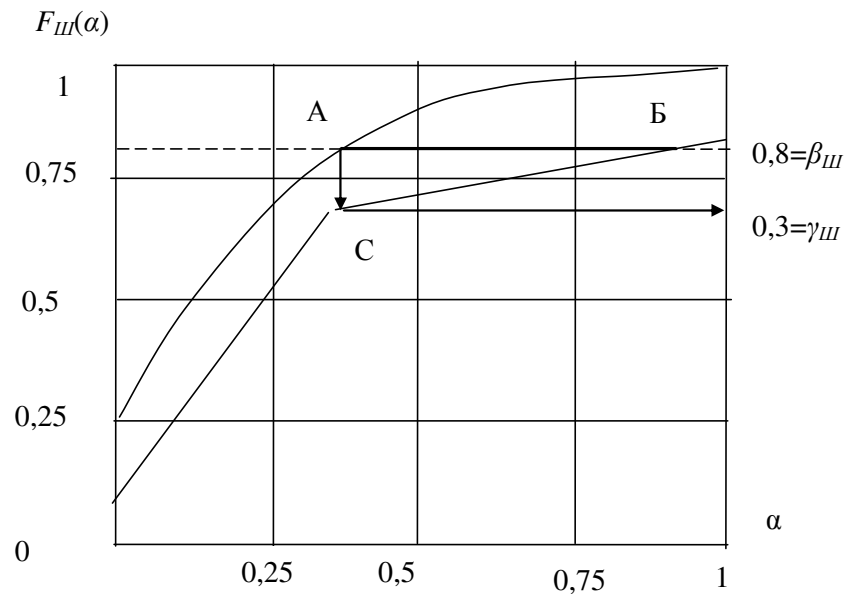


Рис. 3. График для определения качественно-количественных показателей обогащения шихты

Таким образом, решение получено корректным и можно сделать вывод, что для обогащения руды теорема Рейнгардта также справедлива. Однако большое количество графических построений приводит к увеличению погрешности и при малых различиях обогатительных показателей признаков составляющих шихты, приращения выхода может быть сравнимо или отнесено к погрешности.

Загальні питання технологій збагачення

Второй способ решения задачи максимизации выхода. Анализ хода решения предыдущей задачи позволил наметить пути уменьшения графических построений для ее решения это позволяет повысить достоверность расчетных показателей.

Поскольку все обогатительные признаки планируются и горнодобывающее предприятие выполняет производственный план, то на предприятии известны все показатели шихты и составляющих ее разновидностей при отработке забоев месторождения. Определение установочных показателей по обогащению отдельных разновидностей заключается в следующем.

Все разновидности измельчаются до крупности, которая планируется для шихты.

Вычисляются показатели раскрытия и на этом основании строятся кривые обогатимости $F_i(\alpha)$ для каждой разновидности.

Далее, на основании $F_i(\alpha)$ строятся функции зависимости качества обогащенного продукта от положения точки перегиба α_{Π} сепарационной характеристики. Сепарационную характеристику изображаем на графике таким образом, чтобы начало ее имело координаты (0,0), а конечная точка (1,1). Абсцисса точки перегиба соответствовала ординате 0,5. Изменяя положение абсциссы от 0 до 1 и вычисляя значение качества обогащенного продукта найдем искомую зависимость:

$$\beta_{ki} = f(\alpha_{\Pi}).$$

Таким образом, сепарационная характеристика идентифицируется одним параметром – абсциссой точки перегиба.

Вышеперечисленные пункты решения такие же как и в первом способе (пп 1,2).

Первоначально необходимо найти кривые обогатимости для каждой разновидности в отдельности и для шихты.

Рассчитанные кривые обогатимости в соответствии с методикой, изложенной в работе [раскрытие], представлены на рис. 4.

В соответствии с вышеизложенной методикой были построены функции

$$\beta_{ki} = f(\alpha_{\Pi}),$$

для каждой разновидности и для шихты и приведены на рис. 5.

Дальнейшее решение задачи проводится следующим образом.

На рис. 5 проводим горизонталь из точки, соответствующей заданному значению качества концентрата и из точек пересечения ее с кривыми $\beta_{ki} = f(\alpha_{\Pi})$ опускаем вертикали до пересечения с осью абсцисс. Это будут точки идентификации сепарационных характеристик для соответствующих разновидностей.

На рис. 4 с кривыми обогатимостей из абсцисс, соответствующих точкам перегиба сепарационных характеристик восстанавливаем перпендикуляры до пересечения с соответствующими кривыми обогатимости и из точек пересечения проводим горизонтали до пересечения с осью ординат. Отсчет по оси ординат отрезка сверху вниз обозначит выход концентрата соответствующей разновидности. Общий выход концентрата определится как средневзвешенное значение в зависимости от соотношения разновидностей в шихте.

Предположим, что имеются две рудные разновидности с содержанием ценного компонента: в руде-1 – $\alpha_{И1} = 0,4$; в руде-2 – $\alpha_{И2} = 0,25$. Вкрапления ценного минерала в руде-1 – $d_{BK1} = 0,25$ мм, в руде-2 – $d_{BK2} = 0,15$ мм. Руды смешиваются в пропорциях 1:1. (См. условия предыдущей задачи.). Заданное качество концентрата – $\beta_{K3} = 0,8$. В соответствии с этими исходными данными получены кривые обогатимости (рис. 4) и кривые $\beta_{Ki} = f(\alpha_{Pi})$ (рис. 5).

Из точки ординаты (рис. 5), соответствующей заданному качеству концентрата $\beta_{K3} = 0,8$ проводим горизонталь и фиксируем точки пересечения ее с кривыми $\beta_{Ki} = f(\alpha_{Pi})$, $i = 1, 2, III$. Из точек пересечения опускаем вертикали до оси абсцисс и определяем абсциссы точек перегиба сепарационных характеристик сепараторов, которые должны быть применены для разделения соответствующих разновидностей. С учетом некоторой погрешности построения кривых имеем такие числа: $\alpha_{P1} = 0,4$; $\alpha_{P2} = 0,3$; $\alpha_{PIII} = 0,325$.

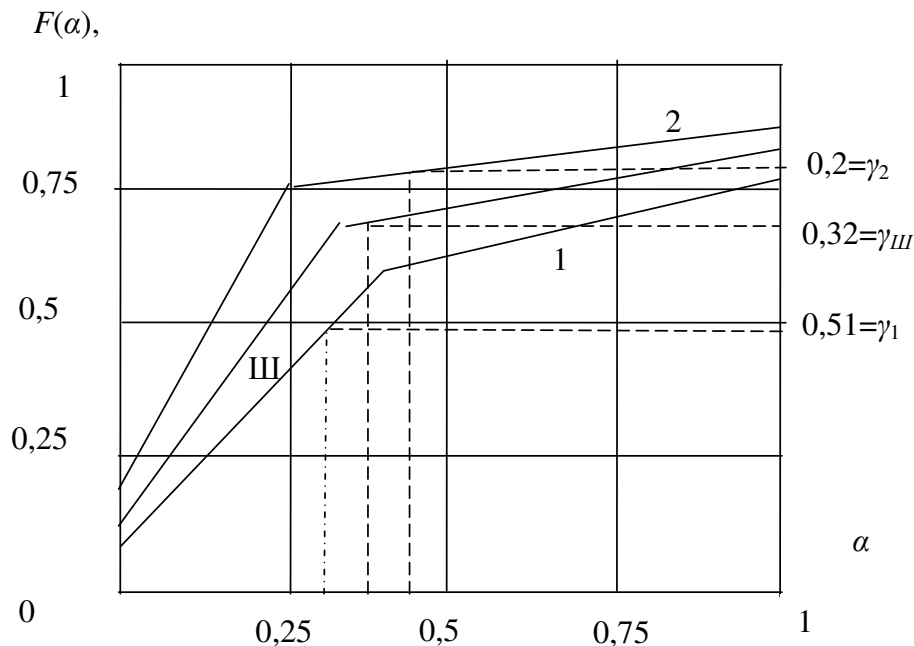


Рис. 4. Функции распределения сродков в измельченных разновидностях руд и шихты (кривые обогатимости):

1 – руда первой разновидности; 2 – руда второй разновидности;
III – шихта из первой и второй разновидностей

Загальні питання технологій збагачення

Из этих точек на рис. 4 восстанавливаем вертикали до пересечения с кривыми обогатимости соответствующих разновидностей, а из точек пересечения проводим горизонтали до оси ординат. Отрезки на оси ординат, отсчитываемые сверху определяют выходы обогащенных продуктов при их сепарации. Эти значения будут такими:

- для руды-1 – $\gamma_1 = 0,51$;
- для руды-2 – $\gamma_2 = 0,2$;
- для шихты – $\gamma_{III} = 0,32$.

Поскольку смешиваются руды в пропорции 1:1, то выход концентрата при обогащении разновидностей по отдельности составляет

$$\gamma_K = \frac{0,51 + 0,2}{2} = 0,35.$$

А выход концентрата из шихты составляет. $\gamma_{III} = 0,32$ Таким образом, выход концентрата при раздельном обогащении разновидностей больше, чем обогащение шихты. Определимся, какие должны быть показатели качества концентрата при раздельном обогащении.

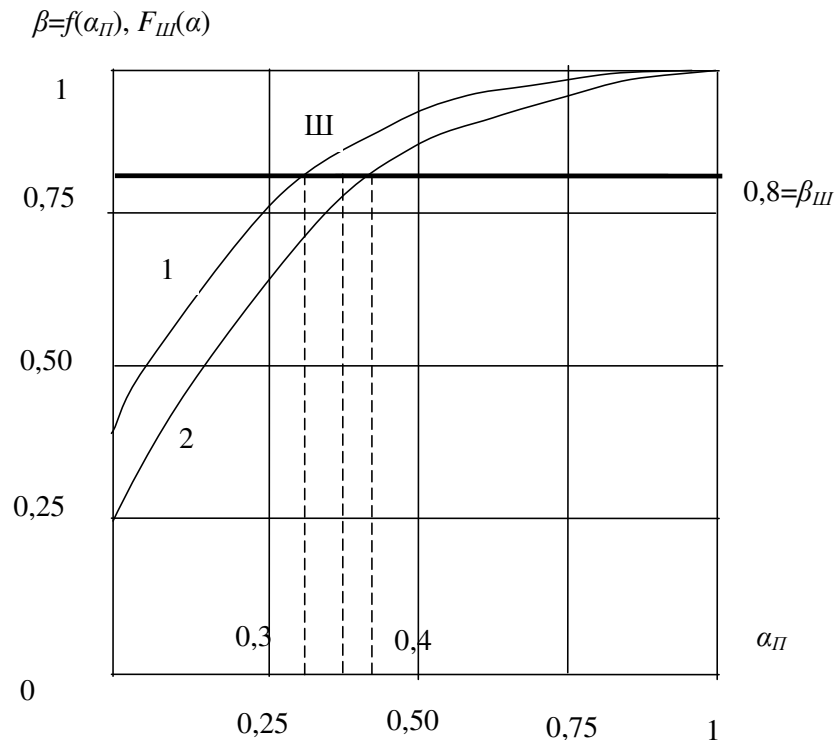


Рис. 5. График для определения качественно-количественных показателей обогащения разновидностей:
1 – руда первой разновидности; 2 – руда второй разновидности;
III – шихта из этих разновидностей

Отметим снова, что отрезки на оси ординат, отсчитываемые сверху определяют выходы обогащенных продуктов при их сепарации и в показателях раскрытия соответствуют

$$\gamma_1 = 0,51 = P_{P3} + P_{PC} + P_{HC}.$$

Содержание открытых рудных зерен соответствует линии разрыва первого рода кривой обогатимости при $\alpha = 1$, а остальная часть отрезка соответствует количеству богатых сростков, извлекаемых в концентрат. Таким образом, имеем:

$$\gamma_1 = 0,51 = 0,24 + P_{PC1}; \quad \gamma_2 = 0,2 = 0,172 + P_{PC2}; \quad \gamma_{III} = 0,3 = 0,177 + P_{PCIII}.$$

Отсюда, имеем:

$$0,27 = 0,51 - 0,24 = P_{PC1}; \quad 0,028 = 0,2 - 0,172 = P_{PC2}; \quad 0,123 = 0,3 - 0,177 = P_{PCIII}.$$

Содержание ценного минерала в сростках соответствующих разновидностей равно: $\alpha_{PC1} = 0,7$; $\alpha_{PC2} = 0,625$; $\alpha_{PCIII} = 0,66$;

Качества концентратов при этом составят:

$$\beta_1 = \frac{P_{P31} + \alpha_{PC1} \cdot P_{PC1} + \alpha_{HC1} \cdot P_{HC1}}{P_{P31} + P_{PC1} + P_{HC1}} = \frac{0,24 + 0,16 \cdot 0,7 + 0,1 \cdot 0,1}{0,51} = 0,724,$$

$$\beta_2 = \frac{P_{P32} + \alpha_{PC2} \cdot P_{PC2}}{P_{P32} + P_{PC2}} = \frac{0,172 + 0,28 \cdot 0,625}{0,2} = 0,947,$$

$$\beta_{III} = \frac{P_{P3III} + \alpha_{PCIII} \cdot P_{PCIII}}{P_{P3III} + P_{PCIII}} = \frac{0,177 + 0,123 \cdot 0,65}{0,32} = 0,807.$$

Результат смешения разновидностей после их раздельного обогащения дает суммарное качество

$$\beta_{смеси} = \frac{0,724 \cdot 0,5 + 0,947 \cdot 0,2}{0,7} = 0,79.$$

Которое, несущественно отличается от заданного значения (поскольку построение графо-аналитическое).

Анализ полученного решения показывает, что чем больше контрастность показателей обогатительных признаков составляющих шихты, тем больше ожидается приращение выхода концентрата при раздельном их обогащении.

Загальні питання технологій збагачення

Покажем состоятельность данного утверждения. Для доказательства прием первоначально руды с резким различием обогатительных признаков:

Руда-1: содержание ценного минерала $\alpha_1 = 0,9$; – вкрапление – 0,3 мм.

Руда-2: содержание ценного минерала $\alpha_2 = 0,15$ – вкрапление – 0,1 мм.

Все расчеты по построению функций обогатимости и $\beta_{ki} = f(\alpha_{\Pi})$ здесь не приводим. На рисунках приведены окончательные результаты для определения ожидаемых выходов. Все построения выполнены в соответствии с упрощенной методикой (рис. 6, 7, 8) и $\Delta\gamma = (1 - 0,1) / 2 = 0,55 - 0,4 = 0,15$.

Теперь, если обогатенные по отдельности разновидности смешать, то получаем

$$\beta_{III} = \frac{0,82 \cdot 0,41 + 0,79 \cdot 0,23}{0,41 + 0,23} = 0,82.$$

Таким образом, решение получено корректным. Различие в выходах концентратов составляет 15%! (рис. 6-8).

Близкие по обогатительным признакам разновидности, например: руда-1: содержание ценного минерала $\alpha_1 = 0,35$ – вкрапление – 0,2 мм; руда-2: содержание ценного минерала $\alpha_2 = 0,25$ – вкрапление – 0,15 мм; обеспечивают приращение выхода $\Delta\gamma = (0,3 + 0,15) / 2 - 0,2 = 0,025$.

Таким образом, чем больше контрастность свойств шихтуемых разновидностей, тем больше приращение выхода при раздельном обогащении разновидностей.

Отсюда также следует вывод, что усреднение рудных разновидностей с резкими различиями в обогатительных признаках существенно снижает выход концентрата и поэтому их усреднение нецелесообразно.

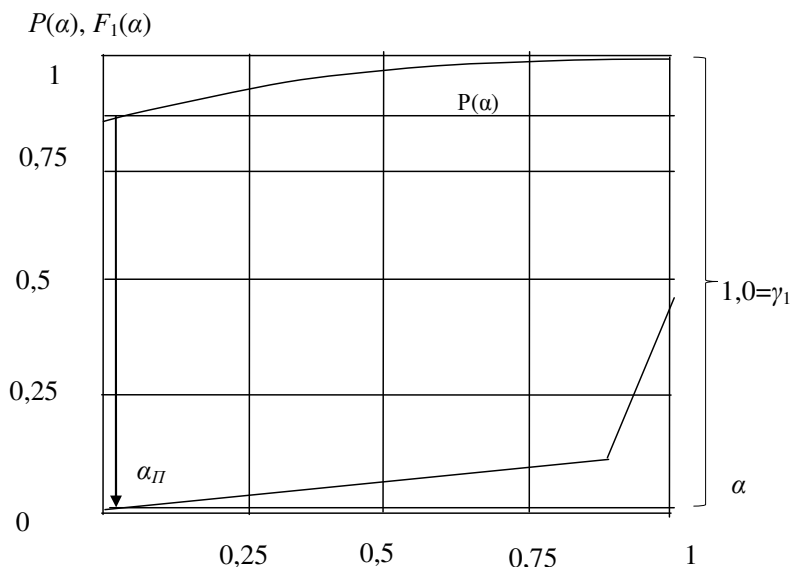


Рис. 6. График для определения качественно-количественных показателей обогащения первой рудной разновидности

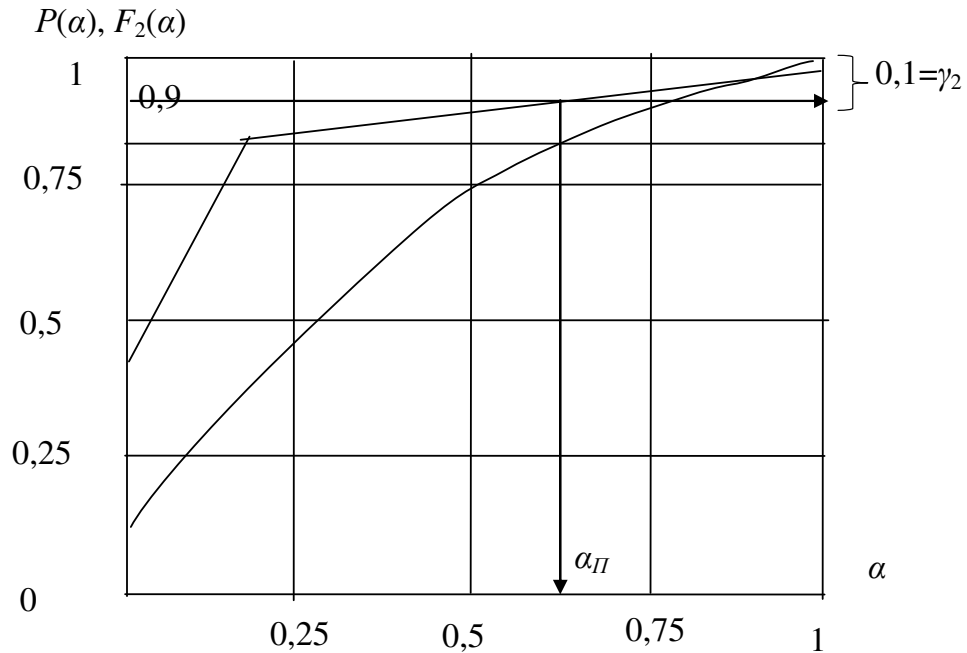


Рис. 7. Графік для визначення якісно-кількісних показників збагачення другої рудної різновидності

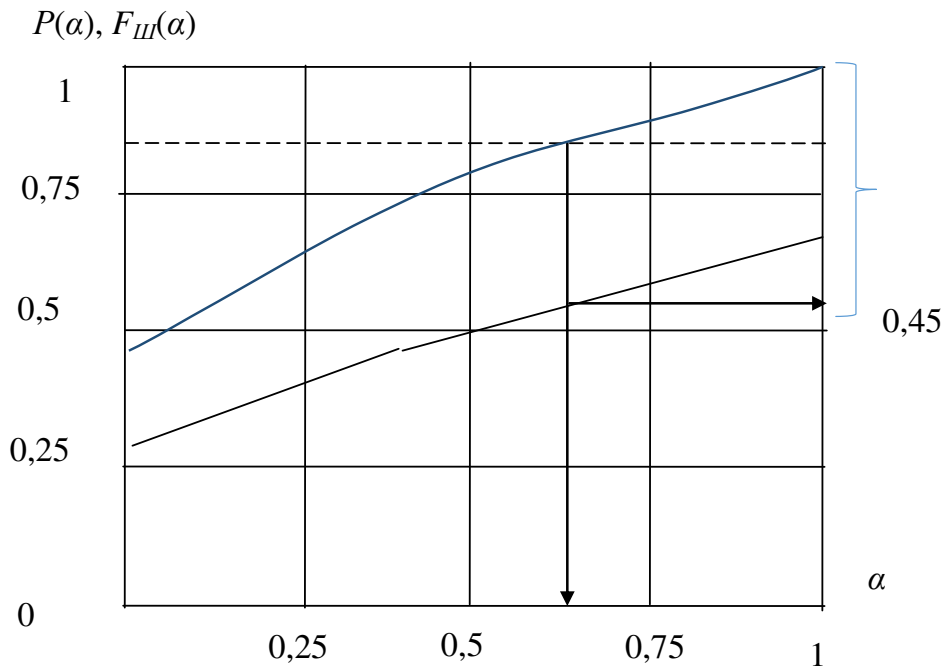


Рис. 8. Графік для визначення якісно-кількісних показників збагачення шихти

Проведене дослідження не підтверджено теоретичним доказательством, але розкриває одне правило теоретичних розрахунків, здійснюваних в аналізі обогатительних процесів.

Загальні питання технологій збагачення

Раскрытие ценного минерала и крупность помола полезного ископаемого связаны между собой нелинейно и с помощью функционалов. Это приводит к следующему.

Обогатительные признаки являются случайными величинами и изменяются в некоторых пределах с известной для месторождения дисперсией. В технологических расчетах используют усредненные показатели. После преобразования их оператором ТЛО (технологической линией обогащения) получают некоторый выходной показатель – β_1 (выход, содержание ценного минерала), полагая его также средним.

Если теперь брать набор случайных значений обогатительных признаков и выполнять преобразование их оператором ТЛО (например, метод Моне-Карло), то получим набор выходных показателей $\beta_i, i = 1, 2, \dots, N$.

Выполнив действия по усреднению выходных показателей:

$$\bar{\beta} = \frac{1}{N} \sum_{i=1, N} \beta_i .$$

Получим соотношение: $\bar{\beta} > \beta_1$.

Итак: усреднение исходных показателей не обеспечивает среднего значения выходного показателя при выполнении действий, предписанных оператором преобразования объекта.

Список литературы

1. Артюшин С.П. Сборник задач по обогащению углей. – М.: Недра, 1979. – 223 с.

© Младецкий И.К., Куваев Я.Г., Левченко К.А., Зашлюк М.И., 2017

*Надійшла до редколегії 20.12.2016 р.
Рекомендовано до публікації д.т.н. П.І. Піловим*