

**И.К. МЛАДЕЦКИЙ**, д-р техн. наук,

**К.А. ЛЕВЧЕНКО** канд. техн. наук

(Україна, Дніпро, Національний технічний університет "Дніпровська політехніка")

## СИНТЕЗ ТЕХНОЛОГИЙ ОБОГАЩЕНИЯ РУД

Обычно промышленные сепараторы разделяют подготовленный продукт таким образом, что выходные показатели изменяют содержание ценного минерала в одном направлении. Этот тезис дает возможность заключить, что в случае бинарного разделения в одном аппарате невозможно получить одновременно богатый обогащенный продукт и бедные хвосты (отходы). Для такого противоречивого требования необходимо технологическое решение или изменение раскрытия. Таким технологическим решением может быть схема, показанная на рис. 1, в которой аппараты для выделения концентрата имеют сепарационную характеристику вида 2 (рис. 2), а для выделения отходов – вида 1 (рис. 2).

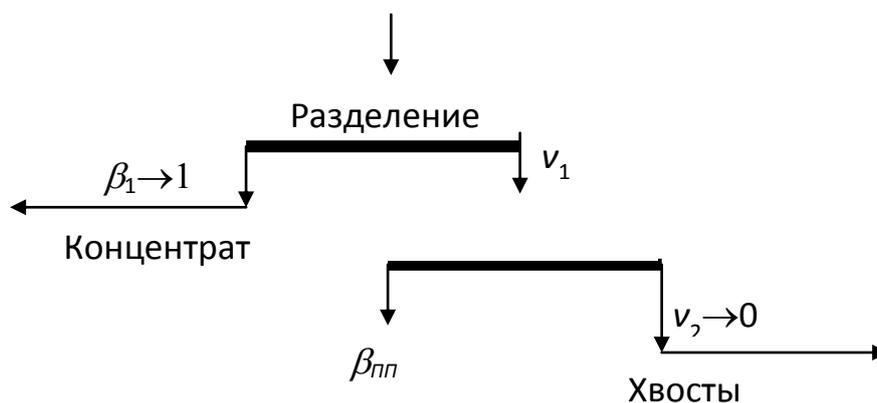


Рис. 1. Технологическая схема разделения минералов с одновременным выделением концентрата и хвостов

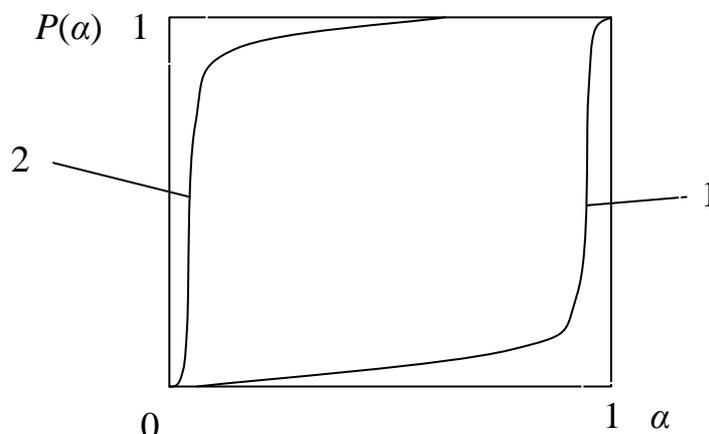


Рис. 2. Сепарационные характеристики для выделения открытых фракций:  
1 – концентрата; 2 – отходов

## Загальні питання технологій збагачення

Выразим показатели раскрытия через один аргумент, называемый раскрытием рудного минерала или просто раскрытием ( $R$ ), который изменяется в пределах  $0 \leq R \leq 1$  [1]. С его помощью содержание фракций в подготовленном продукте можно выразить как:

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

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

$$\beta_{III} = \frac{P_{PC} \cdot \alpha_{PC} + P_{HC} \cdot \alpha_{HC}}{P_{PC} + P_{HC}} = \frac{\alpha_{II} \cdot (1 - R) \cdot \frac{1 + \alpha_{II}}{2} + (1 - \alpha_{II}) \cdot (1 - R) \cdot \frac{\alpha_{II}}{2}}{\alpha_{II} \cdot (1 - R) + (1 - \alpha_{II}) \cdot (1 - R)} = \alpha_{II}.$$

Таким образом, при стадийном выделении открытого минерала исходное содержание ценного компонента по стадиям подготовки неизменно и равно первичному исходному содержанию.

Такое разделение возможно только, когда сепарационные характеристики имеют ступенчатый вид. Такой вид недостижим и поэтому некоторая часть сrostков перейдет в концентрат и в хвосты.

Определим, какие предельные значения содержания ценного минерала могут быть в сrostках, которые могут быть извлечены в концентрат и допустимы, как потери в хвостах.

Для этого примем некоторую характеристику раскрытия (рис. 3) и примем также идеальное выделение предельных частиц, т.е. тех в которых  $-\alpha \geq \alpha_{ГР_К}$  для концентрата и  $-\alpha \leq \alpha_{ГР_Х}$  для хвостов.

С целью определения предельных значений содержания ценного минерала в частицах, извлекаемых в целевой продукт, найдем уравнение отрезков прямых функции распределения сrostков.

Для бедных сrostков основа уравнение имеет вид (рис. 3.):

$$\frac{P_{HC}}{\alpha_{II}} = \frac{P_{HCУ} - P_{HЗ}}{\alpha},$$

решая которое относительно  $P_{HCУ}$ , получаем уравнение:

$$P_{НСУ} = P_{НЗ} + \frac{P_{НС}}{\alpha_{И}} \cdot \alpha.$$

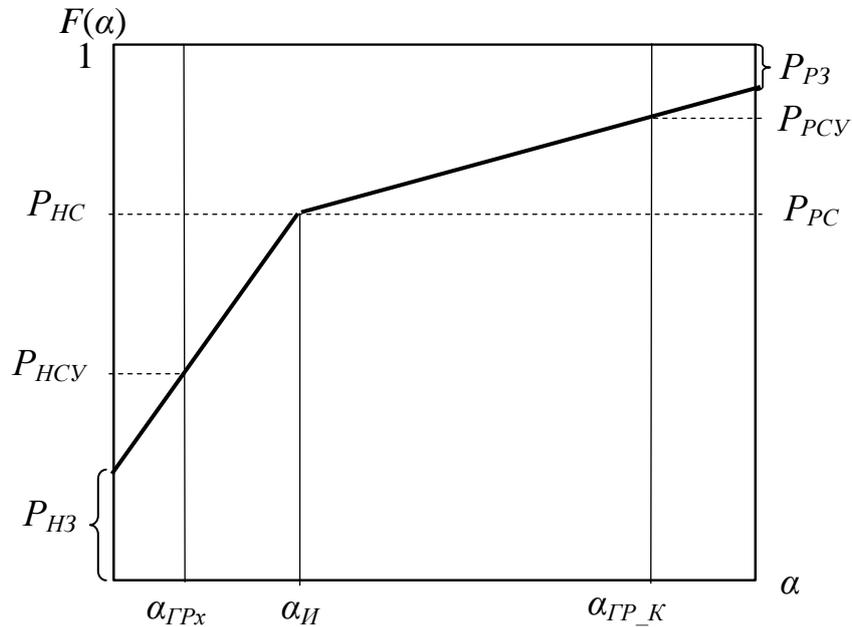


Рис. 3. Функция распределения сростков

Допустимое значение содержания ценного минерала составит на основании известного выражения о средневзвешенном значении:

$$v_{доп} = \frac{\sum_{\alpha=0}^{\alpha_{ГРХ}} \Delta P_{НСУ} \cdot \alpha}{P_{НЗ} + \sum_{\alpha=0}^{\alpha_{ГРХ}} \Delta P_{НСУ}}$$

При значении содержания ценного минерала, когда будет получено допустимое значение потерь, это и будет предельным значением.

Аналогично определяется пороговое значение и для концентрата,

$$\beta_{КЗ} = \frac{P_{РЗ} + P_{РСдоп} \cdot \alpha_{ГР_К}}{P_{РЗ} + P_{РСдоп}},$$

где значения допустимого количества сростков и содержания ценного минерала составляют не менее предельного его значения.

Тогда, допустимое количество сростков составит:

$$P_{PC\text{доп}} = P_{P3} \cdot \frac{1 - \beta_{K3}}{\beta_{K3} - \alpha_{ГР\_К}}$$

С другой стороны (рис. 3)

$$P_{PC2} = P_{PC} \cdot \frac{\alpha_{ГР\_К} - \alpha_{И}}{1 - \alpha_{И}},$$

или

$$P_{PC\text{доп}} = P_{PC} - P_{PC2} = P_{PC} - P_{PC} \cdot \frac{\alpha_{ГР\_К} - \alpha_{И}}{1 - \alpha_{И}}.$$

Тогда

$$P_{P3} \cdot \frac{1 - \beta_{K3}}{\beta_{K3} - \alpha_{ГР\_К}} = P_{PC} - P_{PC} \cdot \frac{\alpha_{ГР\_К} - \alpha_{И}}{1 - \alpha_{И}}.$$

После преобразований относительно граничного значения содержания ценного минерала

$$\frac{P_{P3}}{P_{PC}} \cdot (1 - \beta_{K3}) \cdot (1 - \alpha_{И}) = (1 - \alpha_{ГР\_К}) \cdot (\beta_{K3} - \alpha_{ГР\_К}).$$

Обозначим  $\frac{P_{P3}}{P_{PC}} \cdot (1 - \beta_{K3}) \cdot (1 - \alpha_{И}) = A$ .

Тогда:  $(1 - \alpha_{ГР\_К}) \cdot (\beta_{K3} - \alpha_{ГР\_К}) = \beta_{K3} - \alpha_{ГР\_К} \cdot (1 + \beta_{K3}) - \alpha_{ГР\_К}^2 = A$ ,

и

$$\alpha_{ГР\_К}^2 - \alpha_{ГР\_К} \cdot (1 + \beta_{K3}) + (\beta_{K3} - A) = 0.$$

Решение данного уравнения известно

$$\alpha_{ГР\_К} = \frac{(1 + \beta_{K3}) \pm \sqrt{(1 + \beta_{K3})^2 - 4 \cdot (\beta_{K3} - A)}}{2}.$$

Поскольку  $\alpha_{ГР\_К} \geq 0$ , то

$$\alpha_{ГР\_К} = \frac{(1 + \beta_{КЗ}) - \sqrt{(1 + \beta_{КЗ})^2 - 4 \cdot (\beta_{КЗ} - A)}}{2}$$

Для потерь в хвостах исходное уравнение имеет вид

$$\frac{P_{НЗ} \cdot v_{дон}}{\alpha_{Г} - v_{дон}} = \frac{P_{НС} \cdot \alpha_{Г}}{\alpha_{И}}$$

Которое поле тождественных преобразований принимает вид

$$P_{НС} \cdot \alpha_{Г}^2 - P_{НС} \cdot v_{дон} \cdot \alpha_{Г} - P_{НЗ} \cdot v_{дон} \cdot \alpha_{И} = 0.$$

И решение, которого тривиально

$$\alpha_{Г} = \frac{P_{НС} \cdot v_{дон} \pm \sqrt{(P_{НС} \cdot v_{дон})^2 + 4 \cdot P_{НС} \cdot P_{НЗ} \cdot v_{дон} \cdot \alpha_{И}}}{2 \cdot P_{НС}},$$

или

$$\alpha_{ГР\_Х} = \frac{P_{НС} \cdot v_{дон} - \sqrt{(P_{НС} \cdot v_{дон})^2 + 4 \cdot P_{НС} \cdot P_{НЗ} \cdot v_{дон} \cdot \alpha_{И}}}{2 \cdot P_{НС}}.$$

Поскольку содержание ценного минерала в промпродукте будет неизменным, то примем, что рудная фаза будет выражена через среднюю крупность в виде [2]:

$$d_{ВКi} = \bar{d}_i \cdot \sqrt[3]{\alpha_{И}}$$

И далее все расчеты по раскрытию ведем по формулам для первоначального раскрытия. При этом, нерудная фаза в частицах составит:

$$r_{ВКi} = \bar{d}_i - d_{ВКi} = \bar{d}_i \cdot (1 - \sqrt[3]{\alpha_{И}}).$$

При определении числовых характеристик результатов подготовки и разделения в блоке необходимо учитывать выходы промпродуктов на предыдущем этапе:

$$P_{P3i} = \alpha_H \cdot \int_0^{d_{BK_i}} \left(1 - \frac{d}{d_{BK}}\right) \cdot f(d_i) \delta d;$$

$$P_{H3i} = (1 - \alpha_H) \cdot \int_0^{r_{BK_i}} \left(1 - \frac{d}{r_{BK}}\right) \cdot f(d_i) \delta d;$$

$$f(d_i) = \frac{1}{\bar{d}_i} \cdot \exp\left(-\frac{1}{\bar{d}_i}\right),$$

где  $\bar{d}_i$  – среднее значение крупности частиц в соответствующем блоке.

$$\gamma_{\text{ППО}} = 1$$

$$\gamma_{\text{ПП}i} = \gamma_{\text{ПП}(i-1)} \cdot (1 - \gamma_{K_i} - \gamma_{X_i}).$$

Суммарное содержание ценного минерала в концентрате составит

$$\beta_j = \frac{\sum_{i=1}^j \beta_i \cdot \gamma_{\text{ПП}i}}{\sum_{i=1}^j \gamma_{K_i} \cdot \gamma_{\text{ПП}i}}.$$

Суммарное содержание ценного минерала в хвостах составит

$$v_j = \frac{\sum_{i=1}^j v_i \cdot \gamma_{\text{ПП}i}}{\sum_{i=1}^j \gamma_{K_i} \cdot \gamma_{\text{ПП}i}}.$$

Суммарное содержание ценного минерала в конечном концентрате составит

$$\beta_k = \frac{\left(\sum_{i=1}^j \beta_i \cdot \gamma_{\text{ПП}i}\right) + \alpha_{H_i} \cdot \gamma_{\text{ППК}}}{\sum_{i=1}^j \gamma_{\text{ПП}i} + \gamma_{\text{ППК}}} > \beta_{K3}.$$

Если данное условие выполняется, то дальнейший поиск структуры технологической линии обогащения (ТЛО) прекращаем.

На рис. 4 представлена схема одного технологического блока с выделени-

ем фракцій концентрата, отходов и промпродукта.

Алгоритм формирования структуры ТЛЮ следующий:

1. Моделирование измельчения – функция распределения частиц по крупности в сливе классификатора [1-3, 5, 8].
2. Моделирование раскрытия – получение функции распределения сростков [5, 6, 9].
3. Моделирование сепарации – выделение открытых фракций и получение промежуточного продукта [2, 7].
4. Оценка выхода промежуточного продукта и достижения заданного качества концентрата [5, 6].

Формирование разделительного технологического блока.

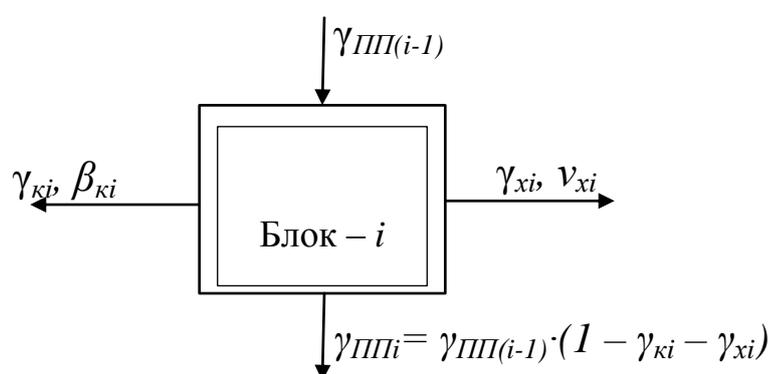


Рис. 4. Схема технологического блока:

- $\gamma_{ПП(i-1)}$  – частный выход промпродукта предыдущей стадии;
- $\gamma_{ki}, \beta_{ki}$  – выход концентрата и содержание ценного минерала в нем, в данной стадии;
- $\gamma_{xi}, \nu_{xi}$  – выход хвостов и содержание ценного минерала в хвостах в данной стадии;
- $\gamma_{ППi} = \gamma_{ПП(i-1)} \cdot (1 - \gamma_{ki} - \gamma_{xi})$  – частный выход промпродукта данной стадии разделения

Действия по первому пункту могут быть приняты из справочной литературы [1] или рассчитаны по измельчительной характеристике с классификацией.

Таким образом, технологический блок обогащения ищется в виде схемы, представленной на рис. 5, 6.

Различие в алгоритмах расчета для первой и для последующих стадий отличается тем, что оператор замкнутого цикла для последующих стадий в числителе не содержит оператора измельчения.

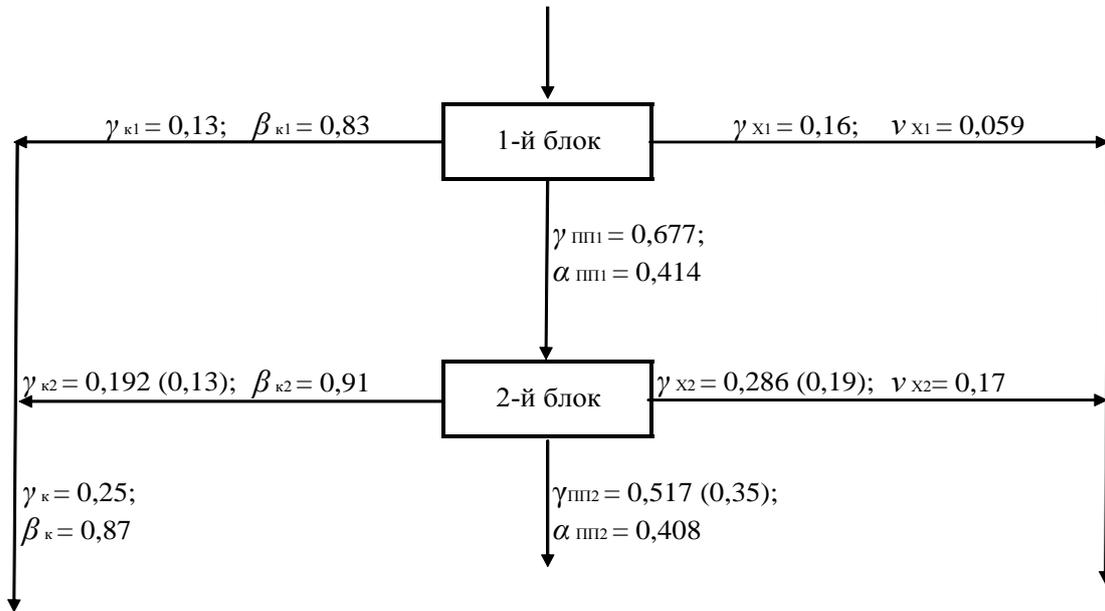


Рис. 5. Схема формирования показателей разделения вдоль технологической линии

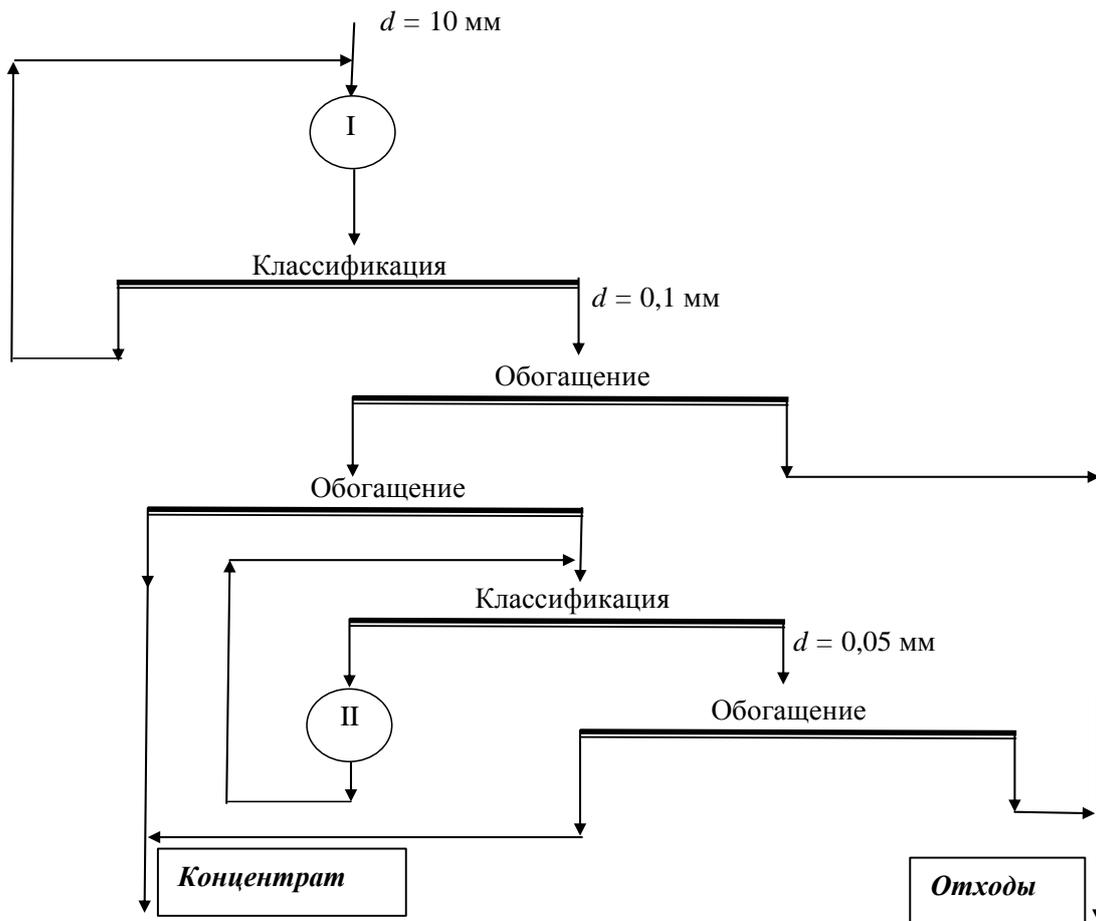


Рис. 6. Структура технологической линии

Таким образом, предложена методика синтеза технологической линии обогащения позволяющая определить количество стадий измельчения, операций обогащения, ожидаемые показатели разделения исходя из размера вкрапленности ценного минерала, сепарационной характеристики разделительного аппарата, допустимого качества концентрата и потерь с отходами переработки.

### Список литературы

1. Справочник по обогащению руд. Обоганительные фабрики, под ред. О.С. Богданова, Ю.Ф. Ненарокова, 2-е изд. Перераб. и дополн. – М.: Недра, 1984, – 358 с.
2. Младецкий И.К. Синтез технологий обогащения полезных ископаемых: Монография. – Днепропетровск: НГУ, 2006. – 161 с.
3. Левченко К.А., Младецкий И.К., Швед В.В., Чвилева А. Особенности стадийного выделения концентрата. Синтез структуры разделительных блоков // Збагачення корисних копалин: Наук.-техн. зб. – 2015. – Вип. 60 (101). – С.31-42.
4. Випробування і контроль процесів збагачення корисних копалин: Навчальний посібник. – І.К. Младецкий, П.І. Пілов, К.А. Левченко, Я.Г. Куваєв. – Дніпро: Журфонд, 2019. – 204 с
5. Левченко К.А., Младецкий И.К., Стадийное выделение тонких фракций при обогащении полезных ископаемых // Збагачення корисних копалин: Наук.-техн. зб. – 2016. – Вип. 62 (103). – С. 3-11.
6. Левченко К.А., Пілов П.І., Младецкий И.К. Методика аналитического расчета технологических показателей обогащения полезных ископаемых // Збагачення корисних копалин: Наук.-техн. зб. – 2014. – Вип. 57 (98). – С. 66-74.
7. Ахметшина И.В, Младецкий И.К., Принцип формирования сепарационного блока // Збагачення корисних копалин: Наук.-техн. зб. – 2014. – Вип. 56 (97). – С. 72-78.
8. Младецкий И.К., Расчет замкнутых циклов измельчения с классификаторами // Збагачення корисних копалин: Наук.-техн. зб. – 2001. – Вип. 12 (53). – С. 36-44.
9. Младецкий И.К., Марюта А.Н Моделирование процесса магнитной сепарации руд. – Киев-Донецк: Вища школа, 1984. – 104 с.

Младецкий И.К., Левченко К.А., 2019

*Надійшла до редколегії 20.08.2019 р.  
Рекомендовано до публікації д.т.н. П.І. Піловим*

УДК 622.7

<http://dx.doi.org/10.13140/RG.2.2.32772.96640>

**А.С. КИРНАРСКИЙ**, д-р техн. наук  
(ФРГ, Мёнхенгладбах, «Инжиниринг Доберсек ГмБХ»)

## СОВРЕМЕННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ И ОБОРУДОВАНИЕ ДЛЯ ОБОГАЩЕНИЯ КАОЛИНА

Мировые ресурсы каолина оцениваются в 14,2 млрд т, в том числе на долю США приходится 9 млрд т. Мировое производство каолина составляет 46 млн т в год. Крупнейший производитель каолина – США, где ежегодно выпускают