

Харламов Е. В., ст. преп.,  
 Шаповалов Р. Р., д-р техн. наук, проф.,  
 Шаптала В. Г., д-р техн. наук, проф.,  
 Шаптала В. В., канд. техн. наук, доц.

Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова

## АГРЕГАТ ДЛЯ ПОЛУЧЕНИЯ СТРОИТЕЛЬНЫХ МАТЕРИАЛОВ ИЗ ОТВАЛОВ ГОРНО-ОБОГАТИТЕЛЬНЫХ КОМБИНАТОВ КМА

[jkharlamov@yandex.ru](mailto:jkharlamov@yandex.ru)

Предложен способ сухого обогащения железосодержащих кварцитов. Разработан аппарат для разделения железосодержащего сырья на кварцевый песок и железосодержащие компоненты. Разработана методика определения дисперсного состава получаемых порошков и коэффициента извлечения магнитных частиц из общей массы.

**Ключевые слова:** разделение, железная руда, кварцит, сепаратор, дисперсный состав, кипящий слой, магнитное поле, коэффициент извлечения.

Обогащение магнетитовых кварцитов на горно-обогатительных комбинатах Курской магнитной аномалии сопровождается накоплением огромных количеств «хвостов» обогащения - нерудных материалов с остаточным содержанием магнита до 7-8% [1].

Образуемые этими материалами отвалы наносят серьезный ущерб окружающей среде и народному хозяйству в целом. Ликвидация и утилизация отвалов горно-обогатительного производства представляет собой актуальную, но очень сложную проблему. Одним из направлений ее решения является использование отходов обогащения железной руды, содержащих до 93% тонкоизмельченного кварцевого песка (кварцита) в строительстве, в частности - дорожном, а также в производстве строительных материалов и изделий. Некоторые технологии использования отвалов требуют предварительного обезжелезивания кварцевого песка, т.е. удаление остаточных магнетитовых частиц. Получаемый при этом железорудный концентрат

может использоваться как наполнитель и пигмент при изготовлении красок специального назначения [2]. Для разделения железосодержащего минерального сырья разработан магнито-аэродинамический сепаратор, в котором магнитное извлечение магнетитовых частиц происходит из кипящего слоя исходного сыпучего материала (рис. 1).

Сущность разработанного аэродинамического способа разделения отходов горно-обогатительного производства состоит в том, что извлечение железосодержащей компоненты из тонкоизмельченного и сходного материала происходит из кипящего слоя частиц, создаваемого восходящим потоком воздуха, проходящим через воздухопроницаемое металлокерамическое днище транспортирующего лотка. Размещение магнитной системы и ленточного транспортера под углом к транспортирующему лотку повышает селективность извлечения магнитных частиц, что способствует повышению чистоты получаемого кварцевого песка.

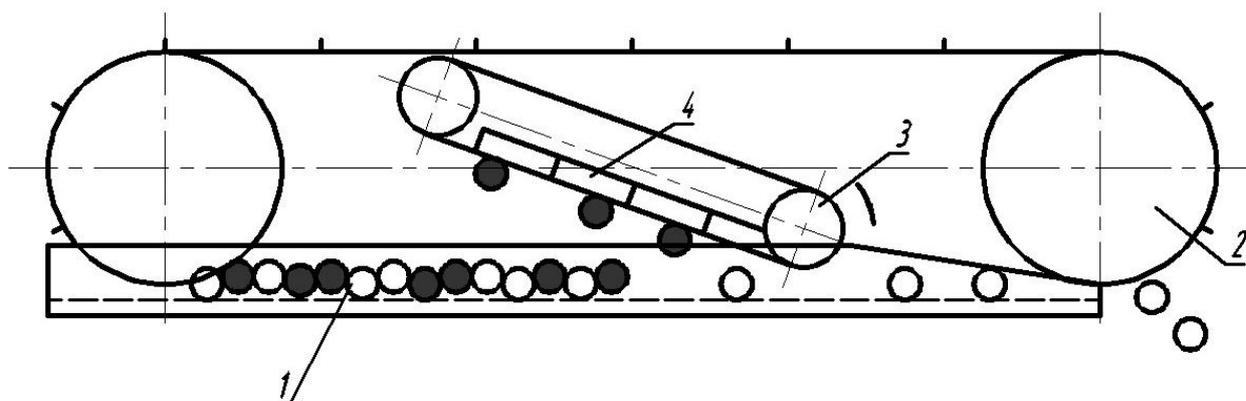


Рис. 1. Конструктивно-технологическая схема магнито-аэродинамического сепаратора:

- 1 – аэрожелоб; 2 – скребковый конвейер; 3 – транспортирующий конвейер;  
 4 – магнитная система; 5 – кипящий слой материала;  
 ● – частицы магнетита; ○ – частицы кварцита

Известно [3], что для извлечения сильно-магнитных магнетитовых частиц достаточно применения сравнительно слабых магнитных полей с напряженностью  $H < 80$  кА/м. Поэтому в разработанном сепараторе используется открытая многополюсная магнитная система, собранная из стандартных постоянных магнитов. Рабочим органом сепаратора является транспортирующая лента, проходящая под магнитной панелью.

Магнетитовые частицы, извлекаемые в рабочей зоне сепаратора, притягиваются к ленте, удерживаются на ней и транспортируются к месту разгрузки.

Разработанный способ разделения железосодержащего сыпучего материала имеет ряд существенных преимуществ:

– процесс разделения происходит в воздушной среде (сухое разделение), что позволяет обойтись без сложных систем водоснабжения и шламового хозяйства;

– аэродинамическое псевдооживление материала из-за отсутствия движущихся деталей намного проще и надежнее вибропсевдооживления;

– простая система управления процессом разделения путем изменения параметров загрузочного устройства, угла наклона магнитной системы и характеристик кипящего слоя;

Использование технологии кипящего слоя позволяет получать сырьё для строительства и лакокрасочной промышленности из отходов горно-обогатительного производства.

Параметры кипящего слоя сыпучего материала тесно связаны с физико-механическими свойствами частиц [4-7]. Разделяемый материал представляет собой двухкомпонентную механическую смесь частиц магнетита и немагнитных частиц кварцита (песка). Магнетит ( $Fe_3O_4$ ) – сильномагнитный минерал черного цвета, содержащий 72,4 % железа. Его плотность  $\rho_{\Pi} = 5260$  кг/м<sup>3</sup>, а магнитная восприимчивость  $\approx 10^{-5}$ . Относительное массовое содержание магнитной и немагнитной составляющих  $f_M \approx 0,07$  и  $f_{\Pi} \approx 0,93$ . Дисперсный состав составляющих исследовался методом лазерной гранулометрии. Результаты этих исследований приведены в таблице 1.

Таблица 1

Дисперсные составы частиц магнита и песка

Фракции частиц ( $d_{i-1}, d_i$ ), мкм	0-5,37	5,37-11,2	11,2-23,2	23,2-40,2	40,2-69,5
Средние размеры фракции $\bar{d}_i$	2,7	8,3	17,2	31,7	55
Относительное массовое содержание фракций магнита, $f_{Mi}$	0,01	0,03	0,11	0,82	0,03
Относительное массовое содержание фракций песка, $f_{\Pi i}$	0,08	0,13	0,17	0,60	0,02

Размеры частиц, указанные в таблице, являются эквивалентными по объему:

$$d = d_{\text{эв}} = \sqrt[3]{\frac{6V_{\text{ч}}}{\pi}} \quad (1)$$

По дисперсным составам составляющих разделяемого материала определяются средние размеры их частиц [8-9]:

– среднеобъемные:

$$\begin{aligned} d_{MV} &= \sum_i \bar{d}_i f_{Mi} = 29,8 \text{ мкм}, \\ d_{IV} &= \sum_i \bar{d}_i f_{\Pi i} = 24,2 \text{ мкм} \end{aligned} \quad (2)$$

– среднеповерхностные:

$$\begin{aligned} d_{MS} &= \frac{1}{\sum_i \left( \frac{f_{Mi}}{d_i} \right)} = 24,9 \text{ мкм}, \\ d_{IS} &= \frac{1}{\sum_i \left( \frac{f_{\Pi i}}{d_i} \right)} = 13,4 \text{ мкм}, \end{aligned} \quad (3)$$

Здесь  $\bar{d}_i = (d_{i-1} + d_i)/2$  – средний размер частиц  $i$ -ой фракции порошка;  $f_{Mi}, f_{\Pi i}$  – относительные по массе содержания  $i$ -ой фракции зерен магнетита и песка.

Среднеобъемные размеры частиц используются при определении действующих на них сил. При определении параметров кипящего слоя используются их среднеповерхностные размеры.

Слой сыпучего материала в связанном состоянии характеризуется его толщиной  $\delta$  и пористостью  $\varepsilon$ , равной относительной доле части объема слоя, занимаемой воздухом:

$$\varepsilon = 1 - \frac{\rho_{\text{н}}}{\rho_{\text{к}}}, \quad (4)$$

где  $\rho_{\text{н}}$  – насыпная плотность материала,  $\rho_{\text{к}}$  – его средняя кажущаяся, т.е. с учетом микропор частиц, плотность.

Обе составляющие материала состоят из частиц неправильной формы – округлых и угловатых. Отличие формы частиц от сферической характеризуется геометрическим коэффициентом

том формы  $\Phi$ , равным отношению площади поверхности частицы к площади поверхности шара такого же объема:

$$\Phi = \frac{S_H}{S_{Ш}} \quad (5)$$

Установлено [5], что для округлых частиц  $\Phi = 1,33$ , для угловых – 1,52, а для вытянутых – 1,72. Коэффициенты формы частиц разделяемого материала определяются по относительному содержанию частиц различной формой и составляют:

$$\Phi_M = 1,65, \quad \Phi_{II} = 1,4 \quad (6)$$

$$w_{кр} = 0,0736 \frac{\mu_0 \varepsilon_{кр}}{d_{см} \rho} \left( \frac{g d_{см}^3 \rho_{см} \rho}{\mu_g} \right)^{0,625} \left( \frac{d_{max}}{d_{см}} \right)^{0,375} = 0,025 \text{ м/с} \quad (7)$$

Здесь  $\mu_0$  – коэффициент динамической вязкости воздуха,  $d_{max}$  – наибольший размер частиц разделяемой смеси,  $\varepsilon_{кр}$  – критическая пористость смеси, соответствующая началу ее псевдооживления, которую можно найти из уравнения:

$$\frac{\Phi^2 (1 - \varepsilon_{кр})}{\varepsilon_{кр}^3} = 11, \quad (8)$$

где  $\Phi$  – среднее значение геометрического коэффициента формы частиц смеси:

$$\Phi = f_{II} \Phi_{II} + f_M \Phi_M \quad (9)$$

Усредненные значения размера частиц  $d_{см}$  и плотности  $\rho_{см}$  частиц двухкомпонентной смеси кварцита и магнетита можно найти по формулам [5]:

$$\frac{1}{\rho_{см}} = \frac{f_{II}}{\rho_{II}} + \frac{f_M}{\rho_M} \quad (10)$$

$$d_{см} = \frac{(f_M \rho_{II} + f_{II} \rho_M) d_{ИС} d_{MS}}{f_M \rho_{II} d_{ИС} \Phi_M + f_{II} \rho_M d_{MS} \Phi_{II}} \quad (11)$$

Толщину кипящего слоя разделяемой смеси можно определить с помощью соотношения:

$$\delta_{кс} = \frac{1 - \varepsilon}{1 + \varepsilon} \delta \quad (12)$$

Найдем параметры кипящего слоя при разделении на экспериментальном сепараторе отвалной кварцито-магнититовой смеси с характеристиками:  $\rho_{II} = 2650 \text{ кг/м}^3$ ,  $\rho_M = 5260 \text{ кг/м}^3$ ,  $f_{II} = 0,93$ ,  $f_M = 0,07$ ,  $\Phi_{II} = 1,4$ ,  $\Phi_M = 1,65$ ,  $\varepsilon = 0,4$ ,  $d_{ИС} = 13,4 \text{ мкм}$ ,  $d_{MV} = 29,8 \text{ мкм}$ ,  $d_{MS} = 24,9 \text{ мкм}$ ,  $\rho = 1,2 \text{ кг/м}^3$ ,  $\mu_g = 1,8 \cdot 10^{-5} \text{ Па}\cdot\text{с}$ ,  $d_{max} = 69,5 \text{ мкм}$ .

По формуле (9) находим:  $\Phi = 1,42$ . Решив численно уравнение (8), получим пористость

Для учета несферичности формы частиц в соотношениях для кипящего слоя вместо размера  $d$  следует брать  $d/\Phi$ .

В разработанном сепараторе слой разделяемого сыпучего материала формируется в лотке прямоугольного сечения, днище которого выполнено из воздухопроницаемого металлокерамического материала ПНС-10. Нагнетаемый через перегородку воздух создает однородный поток, которой проходит через слой сыпучего материала.

Критическая скорость восходящего потока воздуха при которой возникает кипящий слой смеси, определяется по формуле:

кипящего слоя смеси:  $\varepsilon_{кр} = 0,462$ . Толщина кипящего слоя согласно формулы (12) равна:

$$\delta_{кс} = 1,115 \delta \quad (13)$$

Усредненные характеристики разделяемой смеси находим по формулам (10) и (11):  $\rho_{см} = 2745,4 \text{ кг/м}^3$ ,  $d_{см} = 9,7 \text{ мкм}$ .

Расход и давление воздуха, необходимые для создания кипящего слоя разделяемой смеси, определяются по формулам:

$$Q = w_{кр} S \quad (14)$$

$$P = \xi_{мкп} \frac{\rho Q^2}{2S}, \quad (15)$$

где  $S$ ,  $\xi_{мкп}$  – площадь и коэффициент местного сопротивления металлокерамической перегородки-днища транспортного лотка сепаратора. По значениям  $Q$  и  $P$  подбирается вентилятор установки.

Магнитная система разработанного сепаратора представляет собой многополюсную неподвижную панель, набранную из стандартных прямоугольных плоских магнитов с размерами  $120 \times 80 \times 16 \text{ мм}$  (рис. 2)

Материал магнитов – феррит 22БА220 имеет следующие характеристики [7]:  $H_{сВ} = 215 \text{ кА/м}$ ,  $H_{сJ} = 220 \text{ кА/м}$ ,  $H_d = 122 \text{ кА/м}$ ,  $B_r = 0,36 \text{ Тл}$ ,  $B_d = 0,18 \text{ Тл}$ .

Экспериментально установлено [3], что уменьшение нормальной составляющей напряженности магнитного поля многополюсной системы при любых допустимых значениях  $x$  и  $y$  с достаточной точностью подчиняется соотношению:

$$H_z = H_{ср} \exp(-cz), \quad (16)$$

где  $H_{ср}$  – напряженность магнитного поля на поверхности магнитной системы,  $c = \frac{\pi}{S}$  – коэф-

коэффициент неоднородности магнитного поля,  $S$  – продольный шаг полюсов магнитной системы. Для используемой в разработанном магнитно-

аэродинамическом сепараторе магнитной системы  $H_{cp} = 37 \text{ кА/м}$ .

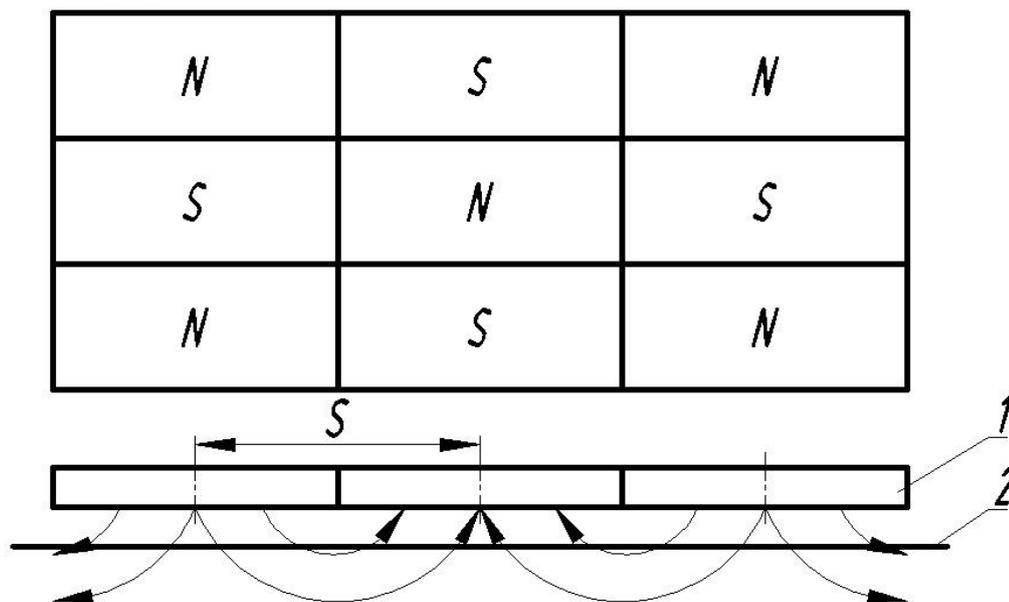


Рис. 2. Схема магнитной системы сепаратора:  
(1 – постоянные магниты, 2 – транспортирующая лента)

На основе закономерностей массопереноса магнитных частиц выведено аналитическое выражение для коэффициента их извлечения:

$$\eta = \sum_{i=1} \left( 1 - \left( \frac{h_2}{h_2 + l_a \operatorname{tg} \alpha} \right) \frac{\chi_{oc}(d_i)}{v_k \sin \alpha} \right) \quad (17)$$

где  $h_2$  – расстояние от поверхности кипящего слоя до магнитной системы,  $l_a$  – длина активной зоны сепарации,  $\alpha$  – угол наклона магнитной системы,  $v_{oc}(d_i)$  – скорость осаждения магнетитовых частиц на ленту транспортирующего конвейера,  $d_i$  – средний размер частиц  $i$ -ой фракции магнетита.

С помощью соотношения (17) проанализировано влияние на качество разделения отвальной смеси основных конструктивно-технологических параметров сепаратора: толщины слоя разделяемой смеси, скорости ее перемещения и угла наклона магнитной системы.

Зависимость (17) хорошо согласуется с результатами экспериментальных исследований и может быть использована при проектировании промышленных сепараторов для получения высококачественного строительного сырья из отвалов горно-обогатительного комплекса.

## БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Кармазин В.И., Кармазин В.В. Магнитные методы обогащения. М.: Недра, 1984. 215 с.
2. Уваров В.А. Оптимизация параметров работы пневмоструйной противоточной мель-

ницы // Омский научный вестник. 2006. № 2(35). С. 17–19.

3. Кармазин В.В., Кармазин В.И. Магнитные и электромагнитные методы обогащения. М.: Недра, 1988. 304 с.

4. Ржевский В.В., Новик Г.Я. Основы физики горных пород. М.: Недра, 1978.

5. Расчеты аппаратов кипящего слоя: Справочник. / Под ред. И.П. Мухлеванова, Б.С. Самина, В.Ф. Фролова. Л.: Химия, 1986. 352 с.

6. Разумов И.М. Псевдооживление и пневмотранспорт сыпучих материалов. М.: Химия, 1972. 240 с.

7. Постоянные магниты: Справочник / А.Б. Альтман, А.М. Гербергер, П.А. Гладынов и др.; Под ред. Ю.М. Пятин. М.: Энергия, 1980. 448 с.

8. Новый подход к определению параметров зернового состава цемента аналитическим способом / В.С. Богданов, Р.Р. Шарапов, Д.В. Богданов, С.Ю. Кабанов // Цемент и его применение. 2011. № 1. С. 135–140.

9. Шаптала В.Г., Шарапов Р.Р., Алфимова Н.И. Прогнозирование дисперсных характеристик высокодисперсных цементов // Строительные материалы. 2007. № 8. С. 24–25.