

УДК 662.772/.778

А.М. ТУРКЕНИЧ, д-р техн. наук,
К.А. ЛЕВЧЕНКО, В.В. ДЕМЕНТЬЕВ, кандидаты техн. наук,
Л.А. ШАТОВА

(Украина, Днепропетровск, Национальный горный университет),

А.Б. РТИЩЕВ, канд. техн. наук
(Украина, Кривой Рог, Центральный горно-обогатительный комбинат)

РЕЗУЛЬТАТЫ ЛАБОРАТОРНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ ПО ВЫДЕЛЕНИЮ ВЫСОКОКАЧЕСТВЕННОГО КОНЦЕНТРАТА МЕТОДОМ ВЫСОКОГРАДИЕНТНОЙ МАГНИТНОЙ СЕПАРАЦИЕЙ ПРИ ОБОГАЩЕНИИ МАГНЕТИТОВЫХ РУД ЦГОКА

Центральный горно-обогатительный комбинат (ЦГОК) обогащает относительно легкообогатимые магнетитовые кварциты Кривбасса. Содержание железа в его концентратах составляет 67,0...68,0%. Для расширения рынка сбыта своей продукции одной из задач комбината является поиск возможных путей повышения содержания железа в концентрате до 69,0...70,0%, что позволит повысить его металлургическую ценность и использовать в порошковой металлургии и производстве металлизированных окатышей.

Один из путей повышения качества концентрата – применение метода высокоградиентной магнитной сепарации в слабом поле (ВГМССП). Проведенные в НГУ исследования по обогащению концентрата Ингулецкого горно-обогатительного комбината показали, что с помощью данного метода можно получить часть концентрата с содержанием железа на 2,0...3,0% выше [1].

Известно, что в высокоградиентных магнитных сепараторах со слабым полем, матрица которых состоит из рифленных пластин, средняя напряженность магнитного поля в зазорах распределяется неравномерно по ширине матрицы [2]. Диапазон напряженности магнитного поля, необходимый для различных типов руд, разный. Установлено, что для концентрата ЦГОКа максимальное среднее значение напряженности магнитного поля не должно превышать на основном приеме 27 кА/м, на перечистном – 24. Минимально возможным является значение 12 кА/м, так как дальнейшее снижение напряженности приводит к резкому падению выхода магнитного продукта при практически одинаковом содержании железа в нем.

При расположении матрицы между блоками магнитов и замыкающим магнитопроводом количество рабочих зазоров на основном приеме – 12, на перечистном – 10. Графики распределения напряженности магнитного поля в рабочих зазорах по ярусам сепаратора приведены на рис. 1.

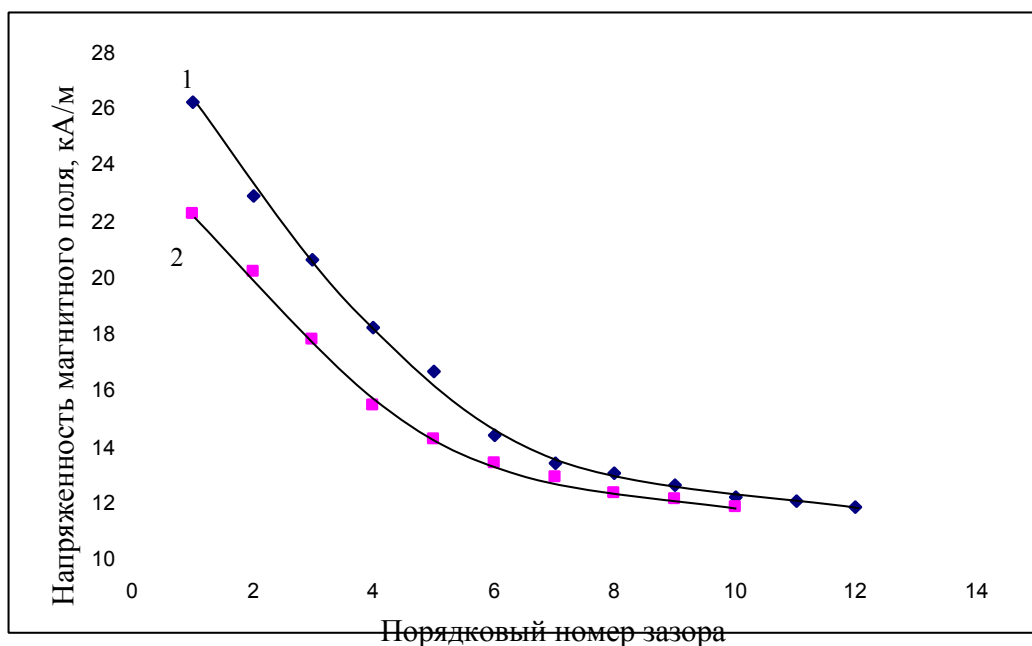


Рис. 1. Розподілення напруженості магнітного поля в робочих зазорах високоградієнтного сепаратора со слабым полем:
1 – основній прийом сепарації; 2 – перерісточної прийом сепарації

Високоградієнтна магнітна сепарація текучого концентрата ЦГОКа проводилась в два приєма с перерісткою магнітного продукту при наступних умовах: вміст твердого в живленні – 20%, ширина зазора між рифлєнними пластинами – 5 мм, крок рифлєнєв пластин – 5 мм, витрата води на промивку магнітних продуктів – 4 мл/г. Якісно-кількісні показателі обогачення приведені в таблиці, з якої видно, що 48,2% концентрата виділено с необхідним вмістом заліза (69,7%). Для підвищення вмісту заліза в магнітних продуктах виконувалась їх промивка, тому вміст твердого в немагнітному продукті склав 3...5%.

Продукти розділення	Показателі обогачення, %		
	Вихід	Вміст заліза	Видобуток
Концентрат	48,2	69,7	49,6
Немагнітний 1	18,9	63,8	17,7
Немагнітний 2	32,9	67,5	32,7
Загальний немагнітний (1+2)	51,8	66,0	50,4

Магнітна і електрична сепарація

Исходный	100,0	67,8 100,0
----------	-------	--------------

Для повышения содержания железа и удаления избыточной воды была выполнена перечистка общего немагнитного продукта (66,0% Fe) при максимальном среднем значении напряженности магнитного поля 36 кА/м. Общая схема ВГМССП приведена на рис. 2.

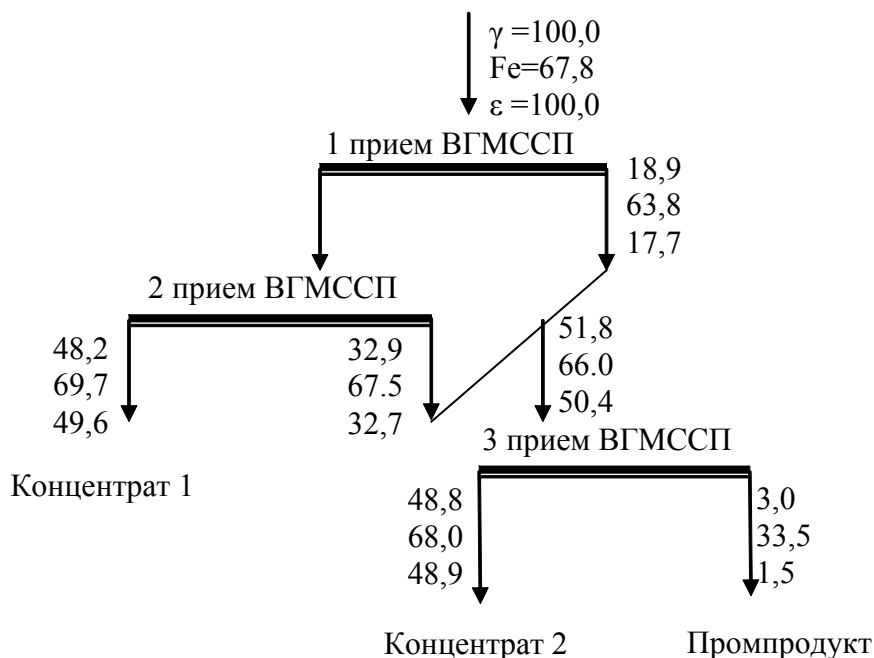


Рис. 2. Общая схема ВГМССП текущего концентрата ЦГОКа

Таким образом, применение метода ВГМССП для обогащения текущего концентрата ЦГОКа позволяет получить 48,2% высококачественного концентрата (69,7% Fe) и 48,8% концентрата с содержанием железа 68,0%, соответствующего по качеству концентрату, получаемому по существующей схеме. Выход немагнитного продукта после третьего приема сепарации составил 3,0% с содержанием железа 33,5%. Весь процесс ВГМССП возможно осуществить на одной машине, имеющей три яруса (рис. 3).

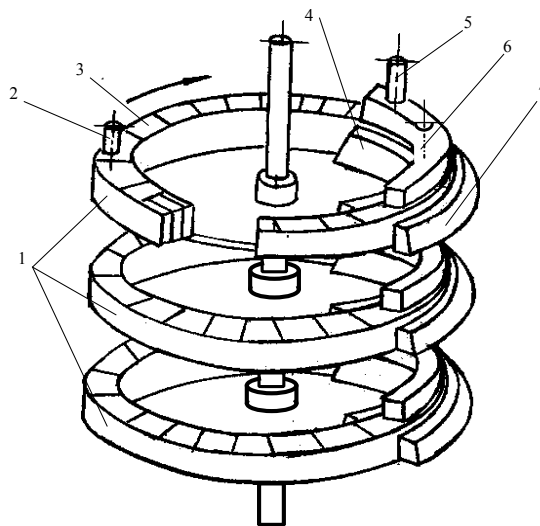


Рис. 3. Принципиальная схема высокоградиентного роторного сепаратора для сильномагнитных руд:

- 1 – яруса сепаратора; 2 – устройство для смыва магнитного продукта; 3 – матрицы; 4 – магнитная система; 5 – питание сепаратора; 6 – устройство для промывки магнитного продукта; 7 – замыкающий магнитопровод

Питанием первого яруса является текущий концентрат ЦГОКа, второго – магнитный продукт первого яруса, третьего – объединенные немагнитные продукты первого и второго яруса.

Список литературы

1. Высокоградиентная сепарация магнетитовых концентратов в слабых магнитных полях в схеме магнитфлотационного обогащения / **А.М. Туркенич, В.В. Дементьев, К.А. Левченко и др.** // Матеріали міжнар. конф. "Форум гірників". – Д., 2005. – Т. 4. – С. 134–136.
2. Определение количеств рабочих зазоров высокоградиентного магнитного сепаратора со слабым полем при обогащении магнетитовых руд / **А.М. Туркенич, В.В. Дементьев, Л.А. Шатова и др.** // Збагачення корисних копалин: Наук.-техн. зб. – 2006. – Вип. 25(66)–26(67). – С. 72–77.

© Туркенич А.М., Левченко К.А. Дементьев В.В., Шатова Л.А., Ртищев А.Б., 2006

*Надійшла до редколегії 15.09.2006 р.
Рекомендовано до публікації д.т.н. І.К. Младецький*

УДК 622.7

В.И. МУЛЯВКО, Т.А. ОЛЕЙНИК, кандидаты техн. наук,
Н.В. КУШНИРУК
(Украина, Кривой Рог, Криворожский технический университет)

85

Збагачення корисних копалин, 2006. – Вип. 27(68)–28(69)

**РАСЧЕТ ПАРАМЕТРОВ БАРАБАННОГО СЕПАРАТОРА С
ВРАЩАЮЩЕЙСЯ МАГНИТНОЙ СИСТЕМОЙ**

Для определения оптимальных параметров барабанного сепаратора с вращающейся магнитной системой [1]: скорости вращения, напряженности магнитного поля, расстояния установки шиберных заслонок, необходимо вывести уравнения движения частиц в рабочей зоне сепаратора отличающиеся диаметром, магнитной восприимчивостью и различной скоростью движения барабана.

Пусть немагнитная частица, поступающая с питателя на вращающийся барабан, отбрасывается от него в верхней точке, т.е. ее скорость направлена горизонтально, оси абсцисс (рис.1). Пренебрегая силой Ампера, запишем систему уравнений второго закона Ньютона для движения частоты в воздухе

$$\begin{cases} ma_x = -F_{c1} ; \\ ma_y = -mg + F_{c2} , \end{cases} \quad (1)$$

где m – масса частицы, кг; a_x, a_y – проекции ускорения частицы на соответствующие оси координат, м/с²; F_{c1}, F_{c2} – силы сопротивления (вязкости), действующие на движущуюся частицу.

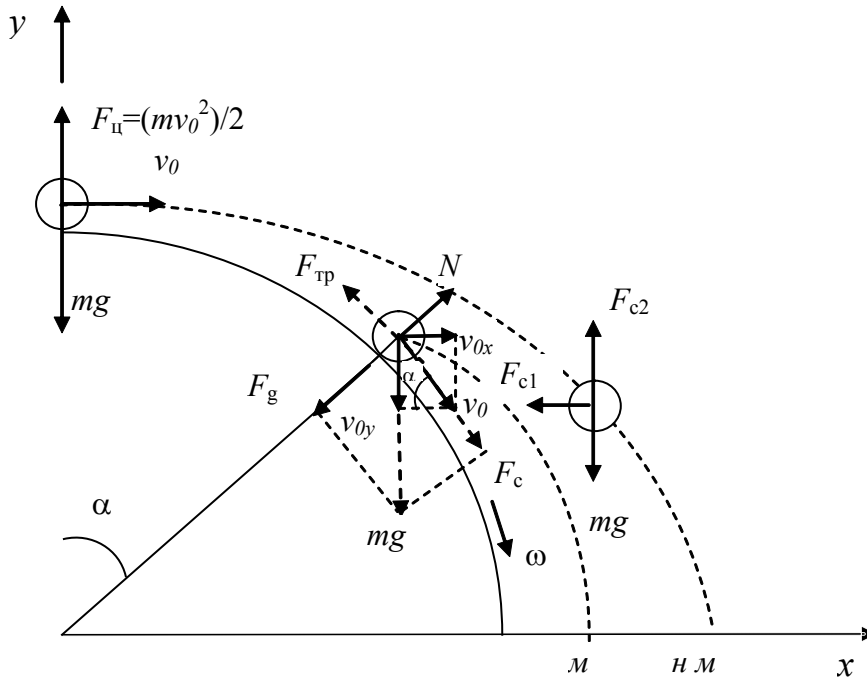


Рис. 1. Силы, действующие на частицы в рабочей зоне сепаратора

Магнітна і електрична сепарація

Для определения координат частицы в любой момент времени дважды проинтегрируем каждое из уравнений системы (1), считая силу сопротивления, в первом приближении, равной силе Стокса. Преобразуем первое уравнение и разделим в нем переменные, получим

$$a_x = \frac{dv_x}{dt} = -\frac{F_{cl}}{m} = -\frac{3\pi\eta v_x d_c}{m}; \int_{v_0}^{v_x} \frac{dv_x}{v_x} = -A \int_0^t dt, \quad (2)$$

где $A = \frac{3\pi\eta d_c}{m}$ – постоянная величина; η – динамическая вязкость воздуха ($\eta=18 \cdot 10^{-6}$ Па·с).

После первого интегрирования и подстановки границ интегрирования запишем

$$\ln \frac{v_x}{v_0} = -At, \quad \text{откуда} \quad \ln v_x = -At + \ln v_0. \quad (3)$$

Преобразуем полученное уравнение (3) к удобному для интегрирования виду:

$$v_x = \frac{dx}{dt} = e^{-At + \ln v_0} = e^{-At} \cdot e^{\ln v_0} = v_0 \cdot e^{-At}. \quad (4)$$

Разделим переменные в (4) и проинтегрируем

$$\int_0^x dx = v_0 \int_0^t e^{-At} dt. \quad (5)$$

В результате получаем одну из координат частицы

$$x = -\frac{v_0}{A} e^{-At} \Big|_0^t = -\frac{v_0}{A} (e^{-At} - 1). \quad (6)$$

Преобразуем второе уравнение системы (2) и разделим в нем переменные

$$a_y = \frac{dv_y}{dt} = -g + Av_y$$

Откуда

$$\int_0^{v_y} \frac{dv_y}{-g + Av_y} = \int_0^t dt \quad (7)$$

После первого интегрирования и подстановки границ интегрирования получаем

$$\frac{1}{A} \left(\ln(-g + Av_y) \right) \Big|_0^{v_y} = t \Big|_0^t, \text{ или } \ln(-g + Av_y) - \ln(-g) = At \quad (8)$$

Преобразуем уравнение (8)

$$\ln \left(\frac{-g + Av_y}{-g} \right) = At, \quad (9)$$

потенцируем его

$$g - Av_y = e^{\ln g + At} = g \cdot e^{At}, \quad (10)$$

разделим переменные и интегрируем

$$\int_R^y dy = \int_0^t (g - g \cdot e^{At}) \cdot \frac{1}{A} \cdot dt,$$

$$y - R = \frac{g}{A} \left[t - \frac{1}{A} e^{At} \right] \Big|_0^t = \frac{g}{A} \left[t - \frac{1}{A} e^{At} + \frac{1}{A} \right], \quad (11)$$

учитывая отрицательный знак ускорения g , получаем

$$y = R + \frac{g}{A} \left[t - \frac{1}{A} e^{At} + \frac{1}{A} \right]. \quad (12)$$

Построим траектории движения немагнитной частицы.

Для этого исключим параметр t из полученной системы уравнений

$$\begin{cases} y = R + \frac{g}{A} \left[t - \frac{1}{A} (e^{At} - 1) \right]; \\ x = \frac{v_0}{A} (1 - e^{-At}). \end{cases} \quad (13)$$

Из первого уравнения системы получаем

$$e^{At} = \frac{1}{1 - \frac{Ax}{v_0}};$$

$$t = \frac{1}{A} \ln \left(\frac{v_0}{v_0 - xA} \right). \quad (14)$$

Подставим значения (14) во второе уравнение системы (13) и получим уравнение траектории движения немагнитной частицы:

$$y = R + \frac{g}{A^2} \left(\ln \frac{v_0}{v_0 - xA} - \frac{v_0}{v_0 - xA} + 1 \right). \quad (15)$$

Рассмотрим движение магнитной частицы. Угол отрыва ее от барабана найдем из условия равенства центробежной силы инерции сумме магнитной силы, действующей на частицу, и проекции силы тяжести на радиус-вектор частицы:

$$F_u = mg \cdot \cos \alpha + F_M. \quad (16)$$

Откуда

$$\alpha = \arccos \left(\frac{F_u}{mg} - \frac{F_M}{mg} \right). \quad (17)$$

Тогда система уравнений (1) запишется так:

$$\begin{cases} ma_x = -3\pi\eta v_x d \div , \\ ma_y = -mg + 3\pi\eta v_y d \div \end{cases} \quad \text{или} \quad \begin{cases} a_x = A v_x , \\ a_y = -g + A v_y . \end{cases} \quad (18)$$

Интегрируем первое уравнение

$$\int_{v_{0x}}^{v_x} \frac{dv_x}{v_x} = -A \int_0^t dt ;$$

$$\ln v_x = -At + \ln v_{0x} , \quad (19)$$

где $v_{0x} = v_0 \cdot \cos\alpha$ – проекция начальной скорости на ось абсцисс.

Второй раз интегрируем это уравнение

$$\int_{R \cdot \sin\alpha}^x dx = e^{-At + \ln v_{0x}} \cdot dt ,$$

и получаем

$$x = R \sin\alpha - \frac{v_{0x}}{A} (e^{-At} - 1) = R \sin\alpha + \frac{v_0 \cos\alpha}{A} (1 - e^{-At}) . \quad (20)$$

Интегрируем второе уравнение системы (18)

$$\int_{-v_{0y}}^{v_y} \frac{dv_y}{-g + Av_y} = \int_0^t dt , \quad \frac{1}{A} \ln(-g + Av_y) \Big|_{-v_0 \sin\alpha}^{v_y} = t , \quad (21)$$

где $v_{0y} = v_0 \cdot \sin\alpha$ – проекция начальной скорости частицы на ось ординат.

После подстановки границ интегрирования получаем

$$\frac{1}{A} [\ln(-g + Av_y) - \ln(-g - Av_0 \sin\alpha)] = t \quad (22)$$

или

$$\ln(-g + Av_y) = \ln(-g - Av_0 \sin \alpha) + At \quad (23)$$

Потенцируем это выражение

$$-g + Av_y = e^{At + \ln(-g - Av_0 \sin \alpha)} \quad (24)$$

Заменяем v_y на $\frac{dy}{dt}$ и преобразуем к виду, удобному для интегрирования.

$$\frac{dy}{dt} = \frac{1}{A} [g - (-g + Av_0 \sin \alpha) e^{At}] \quad (25)$$

Разделим переменные и интегрируем

$$\int_{R \cos \alpha}^y dy = \frac{1}{A} \int_0^t [g - (g + Av_0 \sin \alpha) e^{At}] dt \quad (26)$$

После подстановки границ интегрирования запишем

$$y = R \cos \alpha + \frac{1}{A} \left[gt - \frac{1}{A} (g + Av_0 \sin \alpha) e^{At} + \frac{1}{A} (g + Av_0 \sin \alpha) \right];$$

$$y = R \cos \alpha + \frac{1}{A} \left[gt - \frac{1}{A} (g + Av_0 \sin \alpha) (e^{At} - 1) \right] \quad (27)$$

Исключим параметр t из системы уравнений, описывающих траекторию движения магнитной частицы:

$$\begin{cases} x = R \sin \alpha + \frac{v_0 \cos \alpha}{A} (1 - e^{-At}); \\ y = R \cos \alpha + \frac{g}{A} \left[t - \frac{1}{A} \left(1 + \frac{Av_0}{g} \right) \right] (e^{At} - 1). \end{cases} \quad (28)$$

Из первого уравнения получим

$$e^{At} = \frac{v_0 \cos \alpha}{v_0 \cos \alpha - (x - R \sin \alpha) \cdot A},$$

а

$$t = \frac{1}{A} \ln \frac{v_0 \cos \alpha}{v_0 \cos \alpha - (x - R \sin \alpha) \cdot A}. \quad (29)$$

После подстановки полученных выражений (29) во второе уравнение системы (28) имеем уравнение движения магнитной частицы, покинувшей вращающийся барабан сепаратора

$$y = R \cos \alpha + \frac{g}{A^2} \left[\ln \frac{v_0 \cos \alpha}{v_0 \cos \alpha - A(x - R \sin \alpha)} - \left(1 + \frac{Av_0 \sin \alpha}{g} \right) \cdot \left(\frac{v_0 \cos \alpha}{v_0 \cos \alpha - (x - R \sin \alpha)A} - 1 \right) \right]. \quad (30)$$

Виды траекторий движения магнитных и немагнитных частиц для различных значений диаметров частиц и скорости вращения барабана сепаратора, а также для различных магнитных свойств приведены на рис 2.

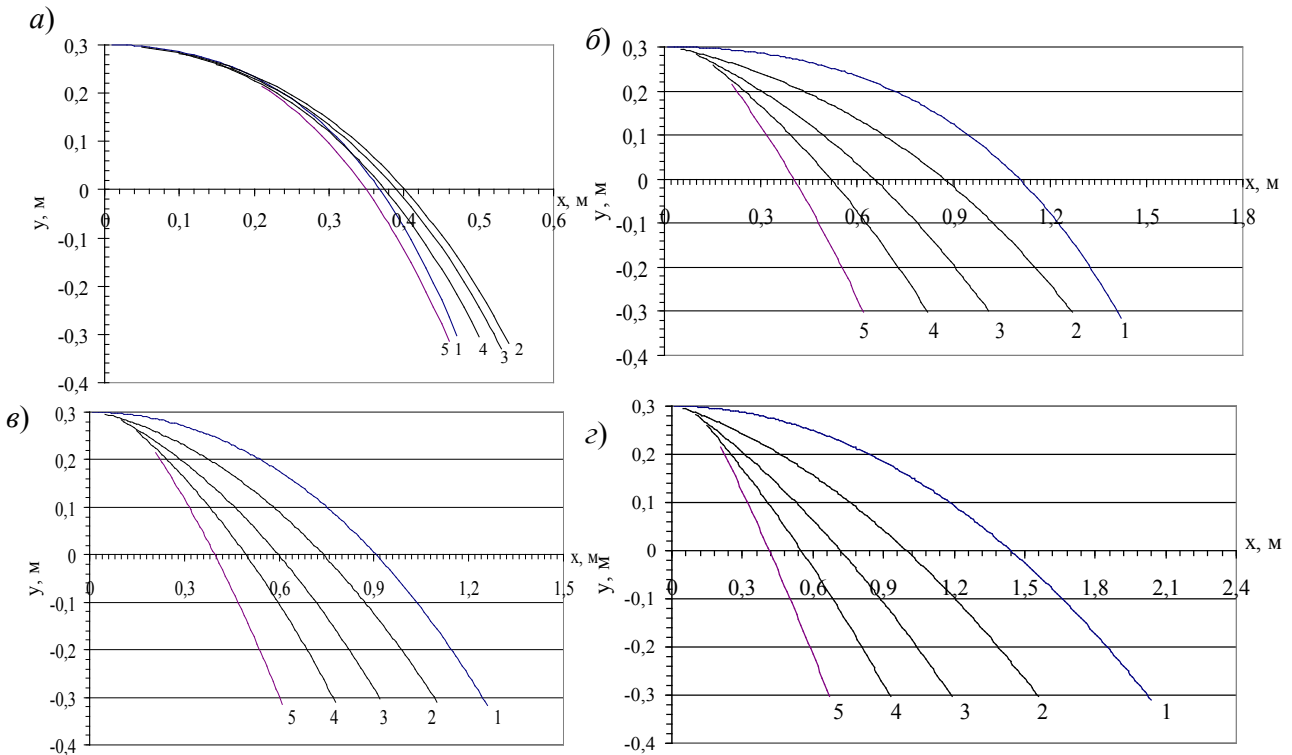


Рис. 2. Траектории движения частицы в рабочей зоне магнитного сепаратора:

Магнітна і електрична сепарація

- а) – 0,25 мм при скорості вращення барабана 2 м/с;
 - б) – 0,25 мм при скорості вращення барабана 6 м/с;
 - в) – 0,5 мм при скорості вращення барабана 4 м/с;
 - г) – 1 мм при скорості вращення барабана 6 м/с;
- 1 – немагнитные частицы; 2 – магнитные частицы (угол отрыва 10 град);
3 – магнитные частицы (угол отрыва 20 град); 4 – магнитные частицы
(угол отрыва 30 град); 5 – магнитные частицы (угол отрыва 45 град)

Наиболее эффективная для разделения частиц граната и других пороодообразующих минералов скорость вращения барабана сепаратора выбирается на основании сравнения результатов траекторий движения минеральных зерен в рабочей зоне сепаратора и разности координат точек падения между магнитными и немагнитными частицами. Согласно данным рис. 2 для частиц различной крупности оптимальной будет скорость вращения барабана 4...6 м/с. Скорость меньше указанной не позволяет разделить исходный продукт на четыре составляющих, а выделяет из общей массы только сильномагнитную фракцию. Дальнейшее увеличение скорости способствует получению ожидаемых продуктов, но координаты траектории движения частиц достигают значений от 2 до 10 м, что выходит за пределы рабочей зоны сепаратора.

Необходимое расхождение в траектории движения минеральных частиц в рабочей зоне сепаратора, сохраняемое при скорости вращения барабана 4...6 м/с, объясняется достаточной разностью между углами отрыва магнитной и немагнитной фракций. Анализ координат точек падения магнитных и немагнитных частиц показывает, что для частиц крупностью 0,25–0,5 мм шиберные заслонки необходимо устанавливать на расстоянии (l_1) 1 м при скорости движения барабана 6 м/с, для частиц 0,5–1,0 мм – 0,8 м при скорости 4 м/с и для частиц крупностью 3,0–1,0 мм – 1,2 м при скорости 6 м/с. Для выделения продукта, состоящего из раскрытого граната, необходимо установить дополнительную заслонку на расстоянии (l_2) 0,6, 0,54 и 0,64 м для классов крупности 0,25–0,5, 0,5–1,0 и 1,0–3,0 мм соответственно (рис. 3). Поэтому при разработке технологии обогащения гранатосодержащих сланцев руду необходимо расклассифицировать на следующие классы крупности –3+1 мм; –1+0,5 мм; –0,5+0,25 мм и 0,25–0 мм. При этом класс 0,25–0 мм представляет собой отходы, в связи с тем, что он не удовлетворяет требованиям, предъявляемым к сырью по содержанию граната.

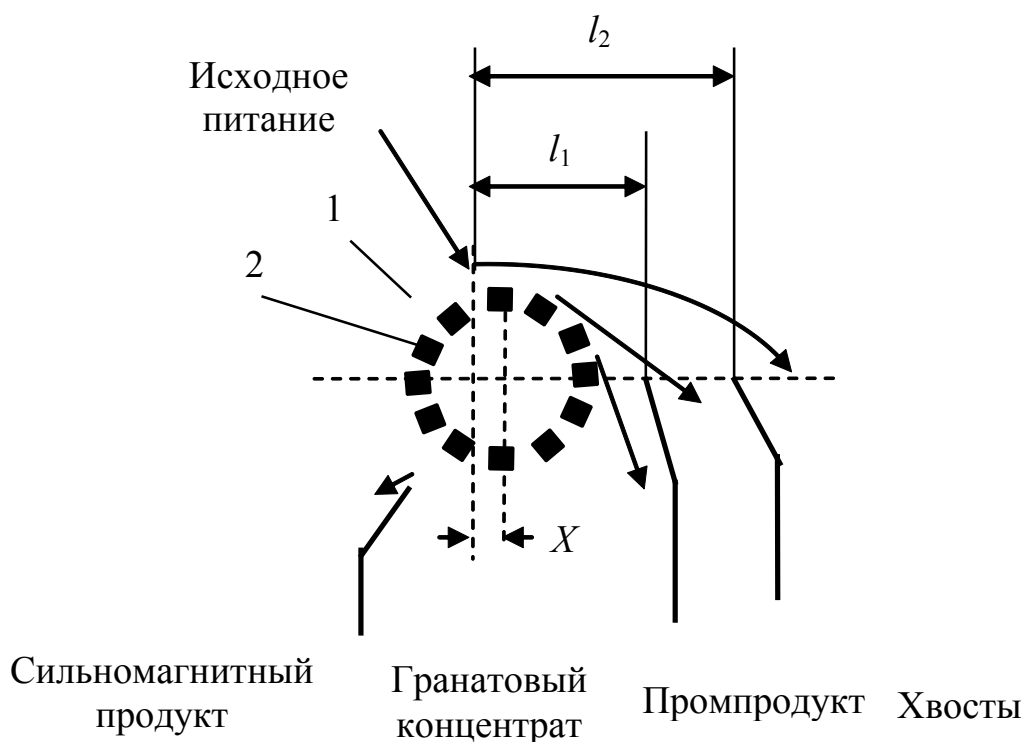


Рис. 3. Схема установки шиберных заслонок в новом сепараторе:

1 – барабан; 2 – магнитная система;

X – эксцентриситет осей вращения барабана и магнитной системы;

l_1 – расстояние от оси барабана до шиберной заслонки, которое отделяет немагнитный продукт; l_2 – расстояние от оси барабана до шиберной заслонки, которое отделяет п продукт

Выполненный сравнительный анализ расчетов координат падения частиц показывает: что кроме скорости вращения барабана на траекторию движения влияет угол отрыва частицы, который зависит от магнитных свойств разделяемых минералов (таблица), что для увеличения скорости эффективного выделения граната из основного потока материала необходимо, чтобы магнитная сила превышала силу тяжести более чем в 4 раза, а это достигается при скорости вращения барабана 4 и 6 м/с и составляет 4,626 и 11,293 раз соответственно. Для скорости вращения барабана 2 м/с это соотношение минимальное – 0,626.

Скорость вращения барабана, м/с	Угол отрыва частицы, град	Отношение F_m/mg
2	10	0,348
	20	0,393
	30	0,467
	45	0,626
4	10	4,348
	20	4,393
	30	4,467

Магнітна і електрична сепарація

	45	4,626
	10	11,015
6	20	11,06
	30	11,134
	45	11,293

Таким образом, благодаря рассчитанным траекториям движения магнитных и немагнитных частиц внутри рабочей зоны сепаратора, установлению оптимального соотношения между магнитной силой и силой тяжести определены: условия классификации материала перед обогащением, оптимальная скорость вращения барабана магнитного сепаратора, границы установки шиберных заслонок для сильномагнитного, магнитного и немагнитного продуктов, что позволит выделить магнетит, раскрытый чистый гранат, гранатсодержащие сродки и фракцию, не содержащую гранат.

Пат. № 2060829 РФ. Магнитный сепаратор для разделения сыпучих материалов / В.Ф. Бызов, Г.В. Губин, В.С. Харламов, В.И. Мулявко, Ю.А. Витовтов, С.В. Мулявко – Оpubл. 27.05.96. Бюл. №15.

© Мулявко В.И., Олейник Т.А., Кушнирук Н.В., 2006

*Надійшла до редколегії 15.09.2006 р.
Рекомендовано до публікації д.т.н. Туркенічем О.М.*

УДК 622.7

Е.Е. ХОРУНЖИЙ

(Украина, Днепропетровск, Национальный горный университет)

ИССЛЕДОВАНИЕ ЗАВИСИМОСТИ ОСНОВНЫХ ПАРАМЕТРОВ ПОТОКА МАТЕРИАЛА ОТ СПОСОБА ПОДАЧИ ПРИ СУХОЙ БАРЬЕРНОЙ МАГНИТНОЙ СЕПАРАЦИИ

Для сухого магнитного обогащения слабомагнитных руд россыпных месторождений разработан барьерный сепаратор без движущихся частей. Он состоит из электромагнитной системы и расположенных между полюсными конечниками матриц. Матрица – это набор наклонных каналов, в которых происходит разделение обогащаемого материала на магнитный и немагнитный

85

Збагачення корисних копалин, 2006. – Вип. 27(68)–28(69)

продукты [1–3].

Для получения исходных данных при разработке сепаратора были выполнены лабораторные исследования барьерной магнитной сепарации. Канал матрицы лабораторного барьерного сепаратора идентичен каналам матрицы промышленного сепаратора. Спроектированный на базе результатов лабораторных исследований, промышленный сепаратор имеет более низкие технологические показатели в сравнении с полученными в лабораторных условиях. Для выяснения причин этого различия были проведены специальные лабораторные исследования.

В лабораторном сепараторе исходный материал по наклонному лотку подается непосредственно в канал матрицы. Ширина лотка равна ширине канала матрицы. Поэтому толщина и высота потока материала,двигающегося в лотке и при входе в канал матрицы, одинаковы. Такая подача материала в дальнейшем будет называться прямой подачей материала (рис. 1 а,в). В промышленном барьерном сепараторе подача материала происходит по всей ширине матрицы, состоящей из нескольких каналов. Поэтому одна часть материала попадает непосредственно в канал, а другая натывается на торцы пластин (рис. 2 а,в). В результате удара эта часть материала подбрасывается, ее скорость уменьшается и только после этого материал входит в матрицу. В дальнейшем такая подача будет именоваться торцевой.

Основным предметом лабораторных исследований явилось различие при входе обогащаемого материала в матрицу барьерного сепаратора в лабораторном и промышленном исполнениях, т. к. при различных способах его подачи кардинально менялось само поведение материала в наклонных лотках непосредственно при входе в матрицу.

Задача проведенных исследований – изучение параметров потока сыпучей гранулированной среды при различных способах подачи его в лоток и влияние условий течения материала в лотке на распределение при входе в канал матрицы сепаратора.

Магнітна і електрична сепарація

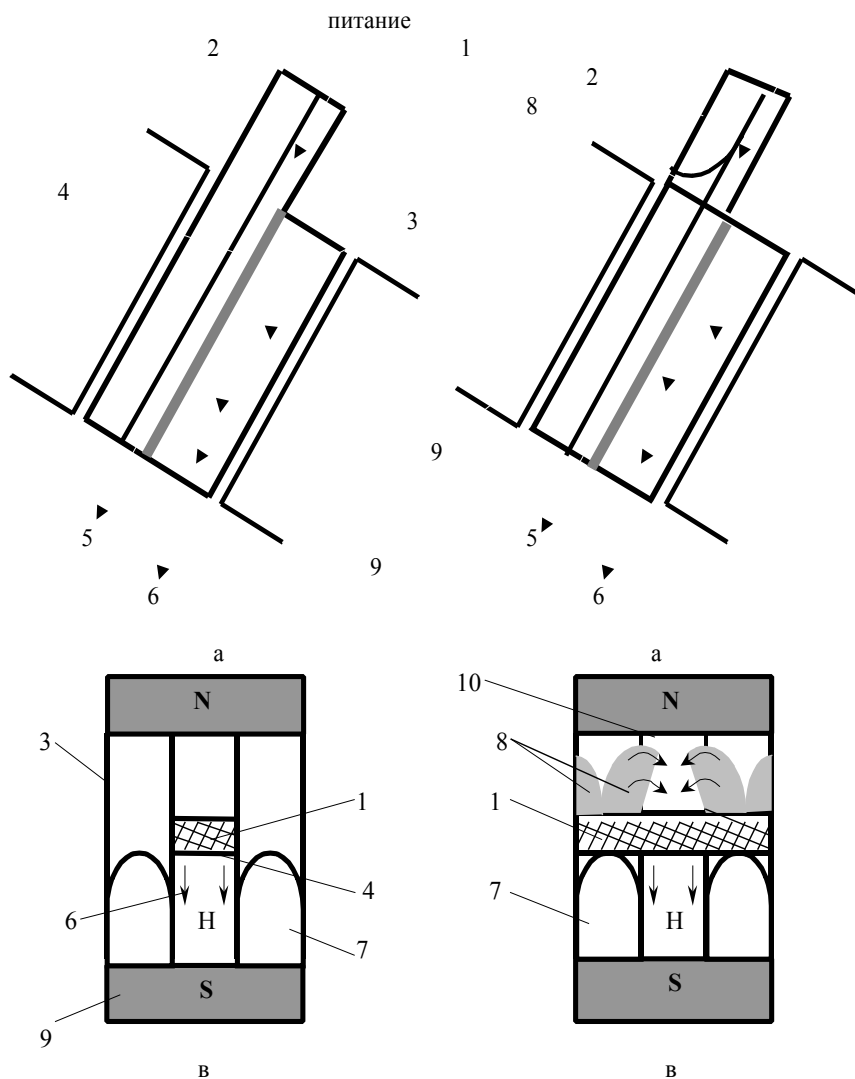


Рис.1. Схема матриці лабораторного бар'єрного сепаратора і процес розподілення матеріала в ній при використанні прямої подачі.

Рис.2. Схема матриці промислового бар'єрного сепаратора і процес розподілення матеріала в ній при використанні торцевої подачі.

Рис. 1. Схема матриці лабораторного бар'єрного сепаратора і процес розподілення матеріала на ній при використанні прямої подачі:

Рис. 2. Схема матриці промислового бар'єрного сепаратора і процес розподілення матеріала на ній при використанні торцевої подачі:

1 – матеріал, подаваний на обогачення; 2 – нахилний вводний лоток;
 3 – матриця сепаратора; 4 – область магнітного бар'єра; 5 – магнітні зерна;
 6 – немагнітні зерна; 7 – ферромагнітні пластини; 8 – частина потоку матеріала, підбрасувана внаслідок торцевого удару; 9 – полюсні наконечники магнітної системи; 10 – стелюшка каналу матриці

Канали в залежності від способу подачі матеріала мали неодинакову

ширину. Следовательно, различными были скорости движения материала у входа в канал матрицы. С учетом этого необходимо было рассмотреть зависимость скорости материала в лотке от удельной производительности его подачи (масса материала на единицу рабочей поверхности лотка в единицу времени).

Механика движения сыпучей среды при проведении лабораторных опытов изучалась с тем же углом наклона лотка, при котором проводились и промышленные испытания барьерного сепаратора, равном 30° к вертикали. Производительность подачи материала в наклонный канал изменялась от 5 до 50 г/с. В основном, опыты проводились при $Q = 17$ г/с, что соответствовало $q = 3$ т/(ч·м) на 1 м фронта подачи питания в промышленном сепараторе.

Для определения толщины слоя движущегося по каналу обогащаемого материала на боковых внутренних стенках каналов по всей их длине были нанесены тонкие линии для измерения высоты, которой достигал материал за время своего течения по лотку при разной производительности подачи и разной длине зоны протекания материала. Каналы имели гладкие внутренние стенки и дно для обеспечения лучшего проскальзывания сыпучей среды [4, 5].

Изначально предполагалось, что обогащаемый материал, движущийся по наклонному лотку, перед входом в канал матрицы сепаратора должен проходить в каждом определенном случае путь разной длины. Поэтому сыпучий гранулированный материал подавался на различном расстоянии от дна лотка, составляющем от 40 до 120 мм при максимальной длине наклонного лотка 120 мм. Конструктивные параметры каналов принимались в зависимости от крупности материала, подвергающегося сухой барьерной магнитной сепарации. Ширина каналов принималась минимально возможной, исключая засорение крупными зёрнами; высота канала принималась такой, чтобы можно было обеспечить ввод в канал поток обогащаемого материала с заданной производительностью его подачи [1]. Ширина каналов соответственно составляла 20 и 10 мм при высоте в 15 мм.

Для изучения эффекта различия в движении и распределении материала при двух различных способах подачи поставлена серия опытов, в ходе которых наклонные каналы, соответственно предназначенные для обоих способов подачи, были совмещены вместе. Причем, это было сделано таким образом, чтобы материал сначала, как при торцевой подаче, истекал вниз в широком лотке

(рис. 3 а), а затем его движение происходило по узкому лотку (рис. 3 б). Каналы соединялись боковыми металлическими пластинками (рис. 3 в), имитирующими собой торцы ферромагнитных пластин матрицы промышленного барьерного сепаратора. Вследствие различия геометрических размеров каналов и соударения материала с металлическими пластинками сепаратора наблюдался своеобразный подброс части исходного материала, который коренным образом

изменял движение и распределение этой части сыпучей среды уже непосредственно в канале матрицы сепаратора.

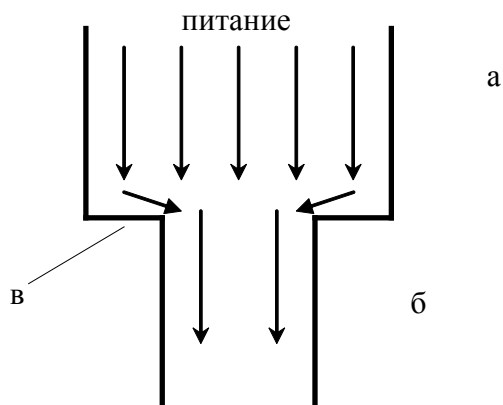


Рис.3. Распределение материала в широком (а)
и узком (б) наклонном лотках

Рис. 3. Распределение материала в широком (а)
и узком (б) наклонных лотках

Подброшенный таким образом к потолочине канала материал содержит большое количество немагнитных частиц. Теперь этим частицам, чтобы проникнуть в немагнитный продукт, необходимо опуститься на слой движущегося в канале материала, а затем пройти сквозь этот слой.

Течение сыпучей среды после столкновения ее с торцами пластин матрицы можно представить как течение материала вокруг препятствия квадратной формы [6].

Рассмотрим движение материала в лотке при оптимальной удельной производительности подачи $Q = 17$ г/с. В табл. 1 приводятся данные лабораторных исследований, в том числе зависимости скорости течения сыпучего гранулированного материала по наклонному лотку и толщины потока в нем от удельной производительности его подачи, графические же данные этой зависимости демонстрирует рис. 4. Как видно из таблицы, в результате незначительного влияния на материал стенок и дна канала в случае торцевой подачи материала скорость его в широком лотке больше при одинаковой удельной производительности подачи.

Таблица 1

Тип подачи материала	Удельная производительность	Скорость течения материала по лотку	Высота потока материала в лотке h_i
----------------------	-----------------------------	-------------------------------------	---------------------------------------

Магнітна і електрична сепарація

	подачі матеріала q , т/(ч·м)	v , м/с	мм
Прямая	1,0	0,036	6
	2,0	0,053	8
	3,0	0,081	9
	5,0	0,107	10
Торцевая	1,0	0,053	4
	2,0	0,071	6
	3,0	0,104	7
	5,0	0,134	8

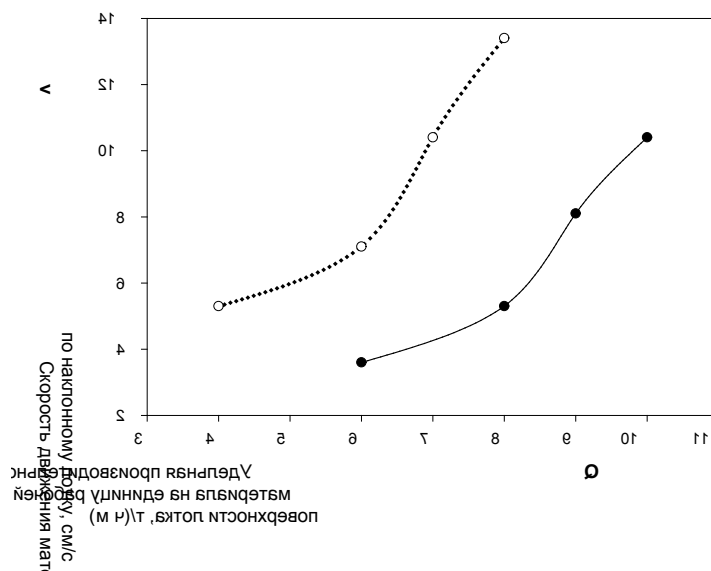


Рис. 4. Залежності швидкості течія сипучого гранульованого матеріалу по нахилному лотку і товщини потоку в ньому від удельної продуктивності його подачі

Очевидно, при торцевій подачі швидкість матеріалу в каналі спостерігається вище. Але частина загального потоку, що рухається досить близько до периферії лотка, після зіткнення з торцями пластин матриці сепаратора має мінімально можливу швидкість. Як наслідок такого підброса матеріалу – суттєве зменшення швидкості загального потоку в порівнянні з прямою подачею, при якій потік безпосередньо з нахилного ввідного каналу потрапляє в матрицю, де і відбувається розділення на магнітний і немагнітний компоненти.

Рис. 5 схематично демонструє рух і розподіл потоку матеріалу в поперечному розрізі обох прямокутних нахлещних каналів.

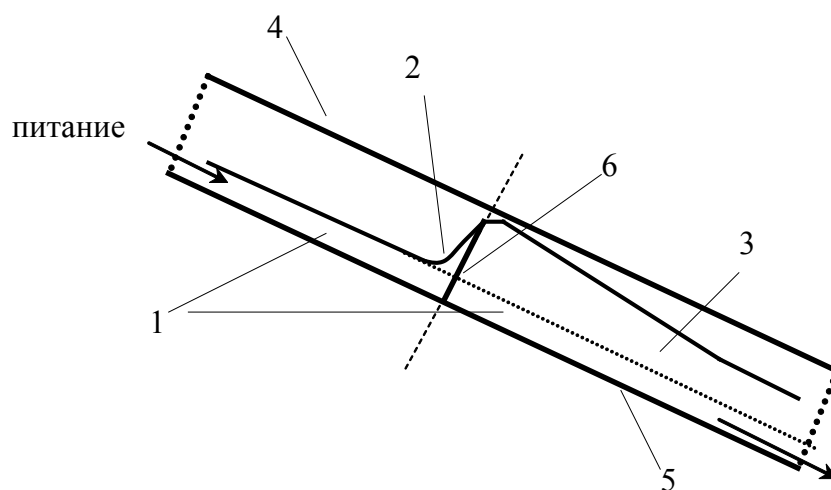


Рис. 5. Розподіл матеріалу в матриці бар'єрного сепаратора при торцевої подачі

Методика проведення експериментів така (рис. 5) вихідний матеріал 1 починає своє рух по широкому нахлещному лотку 4. В момент зустрічі з металевими пластинками, представляючими собою в даному випадку торці ферромагнітних пластин матриці 6, загальний потік матеріалу розпадається на два нерівнозначних. Перший, практично не змінюючи своїх основних параметрів (швидкість, товщина шару), рухаючись в центральній частині широкого каналу, безпосередньо потрапляє в вузький канал 5, імітуючий по конструктивним параметрам матрицю. Другий потік матеріалу рухається з обох сторін широкого лотка у його периферії і наталкується вниз лотка на бічні стінки, наслідком чого служить описаний вище підброс цієї частини матеріалу 2 вгору. Даний підброс помітно уповільнює швидкість матеріалу, практично знижуючи її до нуля. Якщо прийняти швидкість матеріалу в широкому лотку 1 рівною v_1 і товщину його шару за h_1 , то з урахуванням впливу на потік торцевого удару товщина шару підброшеного матеріалу, прийнята за h_2 , буде більше h_1 , але швидкість цього матеріалу буде $v_2 < v_1$. Внаслідок прискорення матеріалу в вузькому каналі до певного числового значення вона прагне перевищити v_1 . Оскільки центральна частина загального потоку матеріалу безперешкодно істекає з широкого нахлещного лотка в вузький, то і товщина шару цієї частини матеріалу залишається незмінною в ньому 1. Тут же відбувається поступове прискорення потоку матеріалу, наталкуваного на торці пластин матриці і підброшеного вгору. По истеченні достатньо короткого проміжку часу відбувається плавна стабілізація швидкості загального потоку сыпучей середовища в вузькому каналі 3, що складається вже з двох змішаних потоків

материала. В свою очередь это приводит к снижению толщины слоя, которую принимаем равной h_3 . Установившаяся скорость двух смешанных после торцевого удара потоков материала в узком лотке, принятая за v_3 , меньше скорости потока материала, который еще до удара о торцы двигался по широкому лотку. Следовательно, $v_2 < v_3 < v_1$ и $h_1 < h_3 < h_2$.

Как отмечено ранее, в начальный момент движения по наклонному лотку происходит постепенное возрастание скорости сыпучей среды до того момента, пока ее поток не достигнет скорости установившегося движения. Вместе с увеличением скорости возрастает и тормозящее влияние от взаимного столкновения зерен материала и их трения о стенки канала. Это постепенно приводит к тому, что по мере приближения потока частиц ко дну канала происходит их торможение. Процесс этот совершается быстрее в узком лотке вследствие влияния расположенных достаточно близко одна к другой стенок самого канала. Вычисления средней и максимальной скоростей потока движущегося в наклонном лотке материала, более подробно описано в [7–10].

Оказывается, скорость в любом слое движущегося в канале потока материала увеличивается в случае применения торцевой подачи, и наблюдается данное явление абсолютно на любой глубине потока. Соответственно, в широком лотке большее значение приобретает и максимальная скорость потока среды. Вычисленные максимальные скорости потока материала составили $v_{\max np} = 0,135$ м/с и $v_{\max торц} = 0,173$ м/с.

Следовательно, профиль скоростей по глубине потока в продольном сечении в широком лотке будет более острым, чем в узком.

Обнаружено, что независимо от способа подачи материала к моменту достижения потоком скорости установившегося движения толщина его приобретает определенное числовое значение вдоль лотка по всей последующей длине вплоть до самого дна и в дальнейшем глубина потока уже не изменяется: он течет с постоянной плотностью. Постоянство толщины слоя материала характерно для каждого определенного массового расхода, с которым сыпучая среда подается в наклонный лоток. Очевидно, толщина слоя материала в канале зависит от производительности подачи и повышается при постепенном ее увеличении. Независимо от расстояния вниз по лотку, которое необходимо преодолеть потоку сыпучей среды перед попаданием в зону магнитного поля, и от того, какой способ подачи указанной среды применяется в каждом конкретном случае, повышение слоя материала в лотке при равномерном течении и увеличении длины зоны протекания не происходит. Сам же метод определения минимальной длины канала при сухой барьерной магнитной сепарации аналитическим путем приведен в [1].

Матрица промышленного сепаратора была спроектирована по результатам лабораторных исследований. Поэтому длина ее изначально канала подобрана таким образом, что при прямой подаче материала немагнитные частицы за

Магнітна і електрична сепарація

время их нахождения в канале успевают выйти из слоя магнитного материала в немагнитный продукт. При торцевой подаче материала с учетом возрастания самого его слоя в канале матрицы время прохождения немагнитных частиц сквозь поток магнитных частиц, взвешенных над областью магнитного барьера, больше времени нахождения этих частиц в канале матрицы. Немагнитные частицы, не успевшие пройти сквозь слой магнитных частиц, поступают вместе с ними в магнитный продукт. Поэтому именно в случае торцевой подачи немагнитным частицам в условиях $h_2 > h_1$ и $h_3 > h_1$ (рис. 5) явно понадобится больший промежуток времени для преодоления ими слоя магнитного материала в матрице.

Данные зависимости скорости потока сыпучей среды в канале матрицы сепаратора от толщины слоя с учетом воздействия на нее торцевого удара показаны в табл. 2. Толщина слоя материала в узком канале (или канале матрицы) при подаче на торцы пластин стабилизируется и устанавливается неизменной на расстоянии около 70 мм.

Длина матрицы барьерного сепаратора составляет $L = 200$ мм, а это значит, что подброшенной вследствие удара части материала будет необходимо преодолеть более $1/3$ ее длины, прежде чем она достигнет слоя материала, движущегося непосредственно над магнитным барьером. Время нахождения подброшенного материала в матрице намного больше того, которое потребуется для материала, поступающего в матрицу при прямой подаче. За более длительное время пребывания частиц в зоне магнитного поля материал, поступивший в магнитный продукт барьерной сепарации при торцевой подаче, не имеет возможности достаточно хорошей очистки от немагнитных частиц. Следовательно, полученный в процессе торцевой подачи магнитный продукт будет содержать большее количество немагнитного (засорения) в сравнении с магнитным продуктом, который получается в результате использования прямой подачи материала.

Таблица 2

Тип подачи материала	Расстояние после удара о торцы пластин l , мм	Скорость материала v_i , м/с	Высота подброса h материала, мм
Торцевая, $Q_{уд}=17$ г/с	0	0,06	12
	10	0,067	11
	20	0,081	9
	30	0,091	8
	50	0,091	8
	70	0,104	7
	100	0,104	7
	120	0,104	7

Магнітна і електрична сепарація

Проведенные лабораторные эксперименты подтвердили, что достаточно сильное засорение немагнитным продуктом наблюдается именно при торцевой подаче сыпучего материала в канал матрицы. В первую очередь, это происходит из-за явления торцевого удара, приводящего к большому засорению магнитного продукта немагнитным.

На рис. 6 изображена зависимость засорения магнитного продукта барьерной сепарации немагнитным материалом от различной удельной производительности подачи материала и длине зоны его протекания по наклонному вводному каналу. Очевиден тот факт, что увеличение производительности подачи исходного материала влечет за собой повышенное содержание немагнитного материала в магнитном продукте. Такая же тенденция наблюдается с возрастанием длины зоны протекания материала по лотку. Следовательно, длина наклонного вводного канала не должна быть достаточно большой для предотвращения повышенного содержания немагнитного материала в магнитном продукте. Методика определения минимальной длины канала описана более подробно в [1].

Проведенные лабораторные исследования подтверждают теоретическое предположение о том, что в случае использования торцевой подачи материала значительное засорение магнитного продукта барьерной сепарации немагнитными зернами происходит вследствие влияния именно торцевого удара, усиление которого непосредственно связано с повышением производительности подачи материала и длины зоны протекания материала по наклонному вводному лотку.

В табл. 3 показана зависимость содержания немагнитного продукта в магнитном от высоты подброса материала при торцевой подаче и оптимальной производительности подачи материала $Q = 17$ г/с в канал, соответствующей $Q = 3$ т/ч на 1м фронта подачи питания в промышленных условиях, а также от длины зоны протекания материала в наклонном лотке.

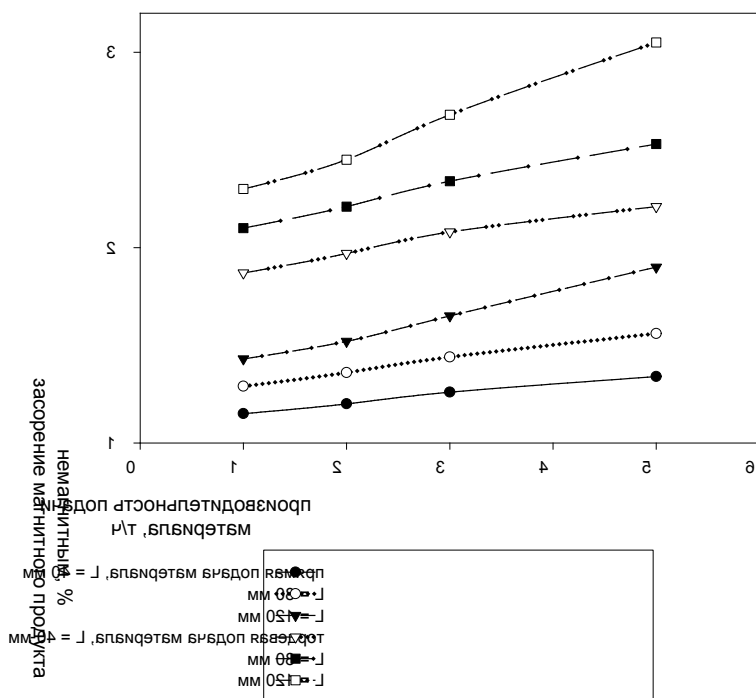


Рис. 6. Зависимость засорения магнитного продукта барьерной сепарации немагнитным материалом

Очевидно, что повышение засорения немагнитным при использовании торцевой подачи материала наблюдается даже при совершенно малой длине зоны протекания материала (40 мм). Таким образом, длина лотка для подачи материала, высота подброса и, как следствие этого, содержание немагнитных частиц в магнитном играют существенную отрицательную роль при использовании данного типа подачи исходного материала при сухой барьерной магнитной сепарации в промышленных условиях.

Таблица 3

Тип подачи материала	Длина зоны протекания материала, мм	Производительность подачи, т/ч	Содержание немагнитного, %	Высота подброса материала, мм
Прямая	40	3,0	1,26	–
	80		1,44	–
	120		1,65	–
Торцевая	40	3,0	2,08	10
	80		2,34	12
	120		2,68	12

Основным заключением всех проведенных исследований барьерного сепаратора может служить то, что в их результате показана абсолютная целесообразность промышленного применения при сухой барьерной магнитной сепарации матриц с прямой подачей материала в канал, т. е. с подачей, при которой исходный материал до входа в матрицу сепаратора не наталкивается на торцы ферромагнитных пластин.

Выводы:

1) При прочих равных условиях (удельная производительность подачи, длина зоны протекания материала по лотку) скорость материала в лотке наблюдается выше в результате применения торцевой подачи материала. Это отрицательно влияет на качество магнитного продукта из-за увеличения содержания немагнитного в нем.

2) Результаты лабораторных исследований показали целесообразность применения при барьерной магнитной сепарации матриц с прямой подачей материала в канал, основным результатом использования которой является меньшее засорение магнитного продукта сепарации.

Список литературы

1. Туркенич А.М., Рудицкий А.В. Барьерная магнитная сепарация зернистых слабомагнитных материалов. – Д.: Национальный горный университет, 2003. – С. 8–24.
2. Turkenich A.M., Baranov U.D., Ruditsky A.V. The barrier magnetic separator for the treatment of weakly magnetic ores: laboratory-scale investigations and industrial tests // Magnetic and Electrical Separation. – 2002. – Vol. 11(4). – P.P. 239–249.
3. Туркенич А.М., Туркенич Р.И. Способ непрерывной магнитной сепарации слабомагнитных материалов и устройство для его осуществления. – Патент Российской Федерации. – № 2209684. – 2003.
4. Гудмен Н., Коунин С. Две задачи о гравитационном течении гранулированных материалов // Механика гранулированных сред. – 1985. – № 36. – С. 64–85.
5. Сэвидж С. Гравитационное течение несвязных гранулированных материалов в лотках и каналах // Механика гранулированных сред. – 1985. – № 36. – С. 86–146.
6. Неддерман Р., Дэвис С., Хортон Д. Течение гранулированных материалов вокруг препятствий // Механика гранулированных сред. – 1985. – № 36. – С. 228–241.
7. Кирия Р.В., Богданов В.М. О движении сыпучей среды по наклонному лотку // Наук. вісн. – 2001. – Вип. 3. – С. 47–51.
8. Кирия Р.В. Кинетический подход к выводу уравнений движения сыпучих сред // Наук. вісн. – Сер. Механика. – 1999. – Вип. 2. – С. 143–150.
9. Зенков Р.Л. Механика насыпных грузов. – М.: Машиностроение, 1964. – 252 с.
10. Лойцянский Л.Г. Механика жидкости и газа. – М.: Наука, 1973. – 847 с.

© Хорунжий Е.Е., 2006

Надійшла до редколегії 18.10.2006 р.

Магнітна і електрична сепарація

Рекомендовано до публікації д.т.н. Туркенічем О.М.