

*И.А. ШВЕДЧИКОВА*, канд. техн. наук, доц., ВНУ им. Даля,  
Луганск  
*М.А. ЗЕМЗЮЛИН*, аспирант, ВНУ им. Даля, Луганск

## **ОЦЕНКА ПАРАМЕТРОВ КОНСТРУКЦИИ ДИСКОВОГО МАГНИТНОГО СЕПАРАТОРА**

The problem about movement of the ferromagnetic particle taken in a working zone of a magnetic separator from a stream of a loose material is considered. The estimation of geometrical parameters in the new disk magnetic separator design is received.

Запропоновано варіант розв'язання динамічної задачі про рух ферромагнітної частки, що вилучається в робочій зоні сепарації у потоці сипучого матеріалу. Проведено оцінювання геометричних параметрів дискового магнітного сепаратора нової конструкції

Предложен вариант решения динамической задачи о движении извлекаемого ферромагнитной частицы в рабочей зоне сепарации в потоке сыпучего материала. Проведено оценивание геометрических параметров дискового магнитного сепаратора новой конструкции.

**Введение.** Одним из наиболее распространенных типов магнитносепарирующих устройств являются дисковые магнитные сепараторы (ДМС), отличительной особенностью которых является наличие индуктора магнитного поля в форме диска. На практике ДМС обычно устанавливаются непосредственно над ленточным транспортером с сепарируемым материалом. На рис. 1 для примера представлен конструктивный вариант ДМС с улучшенными условиями разгрузки извлеченных ферромагнитных предметов, что достигается расположением магнитов индуктора по спирали [1].

Известно [2, 3], что эффективность работы магнитных сепараторов определяется производительностью (количеством сыпучего материала, проходящего через рабочую зону сепаратора за единицу времени) и надежностью извлечения ферромагнитных частиц из потока сыпучего вещества. Надежность извлечения, в свою очередь, зависит от создаваемой магнитной системой извлекающей силы, действующей на ферромагнитные тела в потоке сыпучего материала. Поэтому при заданной производительности основным требованием является обеспечение необходимого уровня извлекающей силы магнитного поля, дос-

таточной для перемещения частицы к поверхности полюсов за время прохождения сепарируемого материала через рабочую зону. В настоящее время эта задача решается преимущественно конструктивным совершенствованием существующих типов магнитных сепараторов.

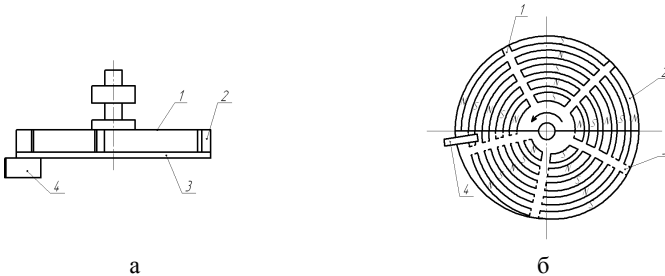


Рис. 1. Дискový магнитный сепаратор [1]: а – общий вид; б – вид снизу (1 – ферромагнитный диск; 2 – магниты; 3 – немагнитный диск; 4 – скребок).

**Анализ предыдущих исследований.** Любое конструктивное решение задачи интенсификации магнитного поля сепаратора требует при практической реализации выбор таких соотношений геометрических размеров полюсной системы, а также других параметров (например, скорости движения ленты транспортера, материала полюсов магнитной системы), которые бы обеспечивали требуемое значение ponderomotorной силы магнитного поля, а, следовательно, и требуемую чистоту сепарации. Обычно выбор требуемого соотношения геометрических размеров полюсов в магнитных сепараторах осуществляется эмпирически. Аналитические методы решения указанной задачи достаточно разработаны для барабанных сепараторов с верхней, нижней [2, 3] и боковой подачей [4, 5] материала в рабочую зону, а также для шкивных электромагнитных сепараторов [6, 7].

В публикации [4] приведен расчет извлекающей силы для барабанного сепаратора с боковой подачей материала, основанный на принятии, со ссылкой на работу [7], пропорциональности скорости относительного движения извлекаемого ферромагнитного тела извлекающей силе магнитного поля сепаратора. В работе [4] принято также допущение о постоянстве силы извлечения в рабочей зоне сепаратора, что следует признать достаточно грубым допущением. Известно, что напряженность поля и ее градиент достаточно быстро убывают с ростом расстояния до поверхности полюсов магнитных сепараторов [2, 3]. Экспериментальные и теоретические исследования магнитных полей

сепараторов с многополюсными системами показали [8], что изменение напряженности поля по нормали к поверхности полюсов определяется экспоненциальной зависимостью. С учетом этого, в [5] получено уточненное расчетное выражение для пондеромоторной силы магнитного поля.

В работе [2] исследованы особенности динамики извлечения частиц при нижней подаче материала, позволившие получить расчетные выражения для магнитных извлекающих сил при сухой и мокрой магнитной сепарации, которые учитывают геометрические размеры питающих устройств и скорость подачи материала в рабочую зону. Однако при этом остается неучтенным характер распределения магнитного поля в рабочем объеме, а также свойства среды, из которой извлекаются ферромагнитные тела.

Таким образом, проведенный анализ предыдущих исследований показал, что, если для барабанных магнитных сепараторов (с верхней, нижней и боковой подачей) и для шкивных электромагнитных сепараторов имеются методики инженерных расчетов магнитной силы и оценки геометрических параметров, обеспечивающих надежное извлечение ферромагнитных включений, то для магнитных сепараторов новых конструкций такие методики должны быть разработаны.

**Цель работы.** В данной работе представлена методика аналитического решения задачи выбора соотношений геометрических размеров ДМС новой конструкции (рис. 1).

**Материал и результаты исследований.** Рассмотрим движение ферромагнитного тела под воздействием внешнего магнитного поля в рабочем объеме ДМС (рис. 1) в соответствии с расчетной схемой, изображенной на рис. 2. Данное движение представляет собой динамический процесс и может быть описано следующей системой уравнений (в проекциях на координатные оси  $X$  и  $Y$ , рис. 2)

$$m \frac{dV_x}{dt} = 0, \quad m \frac{dV_y}{dt} = F_M - mg - F_C, \quad (1)$$

где  $m$  – масса извлекаемой ферромагнитной частицы;  $g$  – ускорение свободного падения;  $V_x = \frac{dx}{dt}$  – скорость переносного движения частицы в магнитном поле в направлении оси  $X$  (горизонтальная составляющая скорости), равная скорости движения ленты транспортера  $V_L$ ;  $V_y = \frac{dy}{dt}$  – скорость относительного движения частицы в магнитном поле в направлении оси  $Y$  (вертикальная составляющая скорости);  $F_M$

– магнитная сила, действующая на извлекаемую частицу;  $F_C$  – сила сопротивления среды при движении частицы.

Ферромагнитное тело начинает свое движение к магнитной системе из точки 1 (рис. 2). По мере продвижения частицы к полюсу магнитная сила будет возрастать до некоторого максимального значения  $F_{M \max}$  у поверхности полюсов. Для дальнейших расчетов примем допущение, что движение ферромагнитной частицы из точки 1 в направлении оси  $Y$  (рис. 2) будет определяться некоторой средней силой  $0,5F_{M \max}$ , постоянной на всем пути ее движения.

Для описания движения извлекаемого ферромагнитного тела при наличии сопротивления среды примем, что это сопротивление пропорционально скорости  $V_X$  относительного движения тела в сыпучей среде

$$F_C = \gamma V_y, \quad (2)$$

где  $\gamma$  – некоторый коэффициент пропорциональности, имеющий физический смысл коэффициента сопротивления сыпучей среды движению в ней тела. Приведенный (на единицу массы) коэффициент сопротивления  $\dot{\gamma} = \gamma / m$  в большинстве практических случаев лежит в пределах  $50 \dots 500, \text{с}^{-1}$  [7, 8].

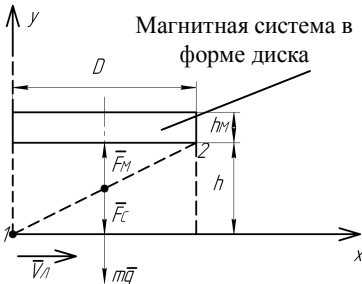


Рис. 2. Расчетная схема извлечения ( $D$  – диаметр магнитной системы;  $h_M$  – высота магнитов;  $h$  – расстояние от магнитной системы до ленты транспортера).

Результатом решения системы уравнений (1) является параметрическое уравнение траектории извлечения ферромагнитного тела при заданных начальных условиях:  $t=0, V_X = V_{\text{л}}, V_y = 0, X_1 = 0, Y_1 = 0$ .

Интегрирование первого уравнения системы (1) с учетом начальных условий позволяет определить зависимость координаты  $x$  траектории извлечения от времени  $t$

$$x(t) = V_{\text{л}} t. \quad (3)$$

Второе уравнение системы (1) также может быть записано в виде

$$m \frac{d^2 y}{dt^2} = F_M - mg - \gamma \frac{dy}{dt}. \quad (4)$$

Если в дифференциальном уравнении (4) принять, что

$F_M - mg = A$  (где  $A$  – некоторая константа), и понизить его порядок, введя новую переменную  $z$ , зависящую от  $t$  и равную  $z(t) = \frac{dy}{dt}$ , то получим следующее выражение

$$mz' = A - \gamma z. \quad (5)$$

Уравнение (5) является линейным неоднородным дифференциальным уравнением первого порядка, решение которого с использованием метода Бернулли [9] позволяет получить следующее уравнение траектории  $y(t)$  извлечения

$$y(t) = \frac{F_M - mg}{\gamma} \left( t + \frac{m}{\gamma} e^{-\frac{\gamma}{m}t} - \frac{m}{\gamma} \right). \quad (6)$$

Избавляясь в (6) от параметра  $t$ , получаем уравнение траектории извлечения для случая начального расположения ферромагнитного тела в точке 1 (рис. 2)

$$y_1 = \frac{F_M - mg}{\gamma} \left( \frac{x}{V_{\text{л}}} + \frac{m}{\gamma} e^{-\frac{\gamma}{m} \frac{x}{V_{\text{л}}}} - \frac{m}{\gamma} \right). \quad (7)$$

Уравнение траектории (7) можно упростить, если учесть численные значения отношения  $\gamma/m$  и пренебречь экспонентой в круглых скобках

$$y_1 = (F_M - mg) \frac{x}{\gamma \cdot V_{\text{л}}}. \quad (8)$$

Практическая ценность полученного уравнения заключается в возможности получения из него соотношения размеров полусной системы ДМС, которое соответствует условию попадания ферромагнитного тела из точки 1 в точку 2 (рис. 2). Для этого подставим в (8) координаты конечной точки предельной траектории (точки 2 на рис. 1), равные  $X_2=D$ ,  $Y_2=h$ , что дает следующее расчетное выражение

$$h = \frac{(F_M - mg)D}{\gamma \cdot V_{\text{л}}}. \quad (9)$$

Если в выражении (9) выразить силу извлечения  $F_M$  через силу тяжести  $mg$ , введя их отношение  $k = F_M/mg$ , где  $k$  – некоторый параметр ( $k > 1$ ), то можно записать соотношение, связывающее между собой такие геометрические параметры, как диаметр  $D$  диска и высоту  $h$  подвески сепаратора

$$h = \frac{(k-1)gD}{\dot{\gamma}V_{\text{л}}} \quad (10)$$

Полученное соотношение (10) является искомым соотношением, связывающим между собой размеры рабочего пространства ДМС, учет которых позволяет обеспечить надежное извлечение ферромагнитных включений из сепарируемого немагнитного сыпучего материала. С использованием выражения (10) построены графические зависимости  $h=f(D)$ , показанные на рис. 3.

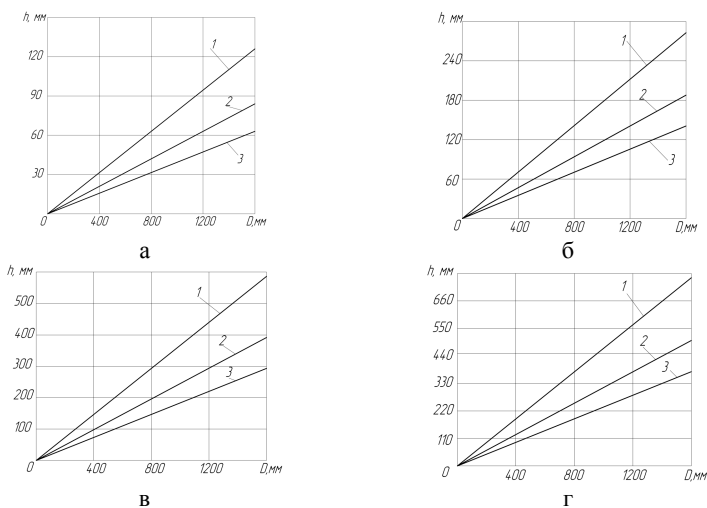


Рис. 3. Изменение высоты подвески  $h$  магнитного сепаратора от диаметра  $D$  диска и скорости  $V_{\text{л}}$  движения ленты транспортера при различных значениях параметра  $k$ : а –  $k=5$ ; б –  $k=10$ ; в –  $k=20$ ; г –  $k=25$   
(1 –  $V_{\text{л}}=2$  м/с; 2 –  $V_{\text{л}}=3$  м/с; 3 –  $V_{\text{л}}=4$  м/с).

При построении графических зависимостей (рис.1.3) приняты усредненные значения параметров  $\dot{\gamma}$  и  $k$ :  $\dot{\gamma} = \gamma / m = 250 \text{ с}^{-1}$ ;  $k=5 \dots 10$  – для феррит-бариевых магнитных систем;  $k=20 \dots 25$  – для магнитных систем на основе редкоземельных магнитов [10]. Максимальная высота  $h_{\text{max}}$  подвески магнитного сепаратора составляет (при  $V_{\text{л}} = 2$  м/с,  $D=1600$  мм):

- для феррит-бариевых магнитных систем:  $h_{\text{max}}=126$  мм – при  $k=5$  и  $h_{\text{max}}=283$  мм – при  $k=10$ ;
- для магнитных систем на основе редкоземельных магнитов:

$h_{\max}=596$  мм – при  $k=20$  и  $h_{\max}=753$  мм – при  $k=25$ .

Полученные результаты подтверждаются практикой эксплуатации известных магнитосепарирующих устройств с возбуждением рабочего магнитного поля от постоянных магнитов.

**Выводы.** 1. Выполнена постановка динамической задачи о движении извлекаемого тела сквозь сепарируемый материал в рабочем пространстве ДМС с расположением магнитов индуктора по спирали.

2. Получено расчетное соотношение, связывающее между собой основные геометрические размеры полюсной системы, учет которых позволяет обеспечить надежное извлечение ферромагнитных включений из сепарируемого немагнитного материала.

3. Практическое использование полученного соотношения требует экспериментальной проверки и уточнения, что является целью дальнейших исследований.

**Список литературы:** 1. Пат. 61551 Україна, МПК В 03 С 1/24. Дисковий магнітний сепаратор / Шведчикова І.О., Земзюлін М.О., Хохола Т.В. – №и 2010 14974; Заявл. 13.12.10; Опубл. 25.07.11. – Бюл. № 14. 2. Кармазин В.В. Магнитные и электрические методы обогащения / В.В. Кармазин, В.И. Кармазин. – М.: Недра, 1988. – 304 с. 3. Кармазин В.И. Современные методы магнитного обогащения руд черных металлов / В.И. Кармазин. – М.: Госгортехиздат, 1962. – 659 с. 4. Яковенко В.В. Расчет необходимой силы извлечения барабанных магнитных сепараторов с боковой подачей сепарируемого материала / В.В. Яковенко, М.Ю. Бранспиз, В.В. Букреев // Вісник Східноукраїнського національного університету ім. В.Даля. – 2006. – №9 (103). – Ч. 1. – С. 218-221. 5. Загирняк М.В. К определению необходимой силы извлечения барабанных магнитных сепараторов с боковой подачей сепарируемого материала / М.В. Загирняк, Ю.А. Бранспиз, И.А. Шведчикова // Вісник Східноукраїнського національного університету ім. В.Даля. – 2009. – №2(132). – С. 140-145. 6. Загирняк М.В. Магнитные сепараторы. Проблемы проектирования: Монография / М.В. Загирняк, Ю.А. Бранспиз, И.А. Шведчикова; Под ред. М.В. Загирняка. – К.: Техніка, 2010. – 224 с. 7. Загирняк М.В. Шкивные магнитные сепараторы / М.В. Загирняк, Ю.А. Бранспиз. – К.: Техніка, 2000. – 303 с. 8. Деркач В.С. Специальные методы обогащения / В.С. Деркач. - М.: Недра, 1966. - С. 338. 9. Пискунов Н.С. Дифференциальное и интегральное исчисления для втузов, т. 2: Учебное пособие для втузов.– 13-е изд.– М.: Наука, Главная редакция физико-математической литературы, 1985. – 560 с. 10. Килин В.И. К выбору полюсного шага магнитных систем сепараторов для сухого обогащения / В.И. Килин, С.В. Килин // Обогащение руд. – 2008. – № 6. – С.14-18.

*Поступила в редколлегию 17.02.2012  
Рецензент д.т.н., проф. Лукиков В.С.*