© В.В. Кармазин, Р.В. Ковалев, Г.А. Епутаев, 2006

УДК 622.7

В.В. Кармазин, Р.В. Ковалев, Г.А. Епутаев

ИССЛЕДОВАНИЕ МАГНИТНЫХ ПОЛЕЙ СИЛ БАРАБАННОГО СЕПАРАТОРА НА ПОСТОЯННЫХ МАГНИТАХ

При взаимодействии минералов с магнитным полем возникают пондеромоторные силы.

До настоящего времени основной и практически единственной формулой для расчета магнитной силы [1], которая используется в исследовательских работах по магнитному обогащению, является:

$$\vec{F}_m = \chi V \vec{H} \nabla \vec{H}, \qquad (1)$$

хотя более точная формула для плоскости имеет вид

$$\vec{F}_m = M_x \frac{\partial \vec{H}}{\partial x} + M_y \frac{\partial \vec{H}}{\partial y}, \qquad (2)$$

где M_x, M_y - горизонтальная и вертикальная составляющие намагниченности.

Разработанный аналитический методы расчета полей систем постоянных магнитов [2] в виде произвольных многоугольников дали возможность поставить задачу определения сил, действующих на частицу в магнитном поле сепаратора в более удобном виде.

Имеем однодоменную частицу с магнитным дипольным моментом $\vec{\rho}_m$, находящуюся в поле с магнитной индукцией $\vec{B}$. Энергия взаимодействия частицы с магнитным полем определяется как функцией зависящей от дипольного момента и магнитной индукции:

$$U_m = f\left(\vec{\rho}_m, \vec{B}\right) \qquad (3)$$

В неоднородном магнитном поле, которое характеризуется вектором магнитной индукции $\vec{B}$ и вектором намагниченности $\vec{J}$, на частицу действует результирующая объемная плотность пондеромоторной силы

$$\vec{F} = \mathrm{grad}\left(\frac{\vec{\rho}_m \vec{B}}{2}\right), \qquad (4)$$

где $\vec{F}$ - сила, Н; $\vec{\rho}_m$ - магнитный дипольный момент вещества, А/м^2, $\vec{B}$ - магнитная индукция, Тл.

В то же время, намагниченность вещества определяется, с одной стороны,

$$\vec{J} = \lim_{V \to 0}\left(\frac{\vec{\rho}_m}{V}\right), \qquad (5)$$

а, с другой стороны,

$$\vec{J} = \chi_m \vec{H},$$

где V - объем, м^3, χ_m - магнитная восприимчивость, $\vec{H}$ - напряженность магнитного поля, А/м.

Уравнение (4) с учетом уравнения (5) записывается через намагниченность вещества

$$\vec{F} = \mathrm{grad}\left(\frac{\vec{J}_S \vec{B}}{2}\right). \qquad (6)$$

Принимаем
$J_S = \text{const}$.

Раскрывая скалярное произведение векторов в формуле (4), получаем

$$\vec{F} = \text{grad}\,(\frac{1}{2} J_S B \cos\alpha). \qquad (7)$$

Если α - угол между векторами $\vec{B}$ и $\vec{J}_s$; β - угол между вектором магнитной индукции $\vec{B}$ и осью x; γ - угол между вектором намагниченности $\vec{J}$ и осью x, то $\alpha = \beta - \gamma = 0$

$$\cos\alpha = \cos(\beta - \gamma) = \cos\beta\ \cos\gamma + \sin\beta \sin\gamma =$$
$$= \frac{B_x}{B}\cos\gamma + \frac{B_y}{B}\sin\gamma$$

Раскрывая $\text{grad}(\frac{J_s B}{2})$ на плоскости в декартовой системе координат, получаем

$$\vec{F} = \frac{1}{2} J_s \left(\frac{\partial B_x}{\partial x}\cos\gamma + \frac{\partial B_y}{\partial x}\sin\gamma \right)\vec{i} +$$
$$+ \frac{1}{2} J_s \left(\frac{\partial B_x}{\partial y}\cos\gamma + \frac{\partial B_y}{\partial y}\sin\gamma \right)\vec{j} \qquad (8)$$

Из формулы (6) видно, что горизонтальная составляющая силы имеет вид

$$F_x = \frac{1}{2} J_S \left(\frac{\partial B_x}{\partial x}\cos\gamma + \frac{\partial B_y}{\partial x}\sin\lambda \right), \quad (9)$$

вертикальная составляющая силы

$$F_y = \frac{1}{2} J_s \left(\frac{\partial B_x}{\partial y}\cos\lambda + \frac{\partial B_y}{\partial y}\sin\gamma \right), \quad (10)$$

а модуль пондеромоторной силы

$$F = \sqrt{F_x^2 + F_y^2} \qquad (11)$$

В неподвижном сепараторе векторы $\vec{B}$ и $\vec{J}_s$ имеют одно и тоже направление, поэтому $\alpha = 0$ и
$\cos\ \alpha = \cos(\beta - \gamma) = 1$.

При расчетах сил в неподвижном сепараторе $\beta = \gamma$

Составлены программы табуляции полученных формул и рассчитано поле модулей сил в относительных единицах при $\frac{\mu_0\, J \cdot J_s}{4\pi} = 1$, которое изоб-ражено на рис. 1.

Для определения закономерностей движения частиц сепарируемого материала необходимо знать изменение сил в рабочей зоне. Как и для магнитных индукций, так и для пондеромоторных сил необходимо иметь формулы их изменения в полярной системе координат. Это преобразование выполнено следующим образом

$$F_X\ (\rho,\alpha) = F_x\ \left(x(\rho,\alpha),\ \ y(\rho,\alpha)\right),$$

$$F_Y\ (\rho,\alpha) = F_y\ \left(x(\rho,\alpha),\ \ y(\rho,\alpha)\right),$$

$$F(\rho,\alpha) = F_x(\rho,\alpha) + j \cdot F_y(\rho,\alpha),$$

$$F_\rho(\rho,\alpha) = \left|F(\rho,\alpha)\right| \cdot \cos(\alpha - \arg(F(\rho,\alpha)),$$

$$F_\tau(\rho,\alpha) = \left|F(\rho,\alpha)\right| \cdot \sin(\alpha - \arg(F(\rho,\alpha)),$$

$$F(\rho,\alpha) = F_\rho(\rho,\alpha) + j \cdot F_\tau\ (\rho,\alpha). \qquad (12)$$

Построены графики изменения радиальной и тангенциальной составляющих магнитной силы на внешней поверхности барабана (рис. 2, 3) и в 20 мм от этой поверхности (рис. 4).

Графики показывают, что значение тангенциальной составляющей силы на порядок меньше радиальной составляющей силы, следовательно, тангенциальной составляющей силы можно пренебречь.

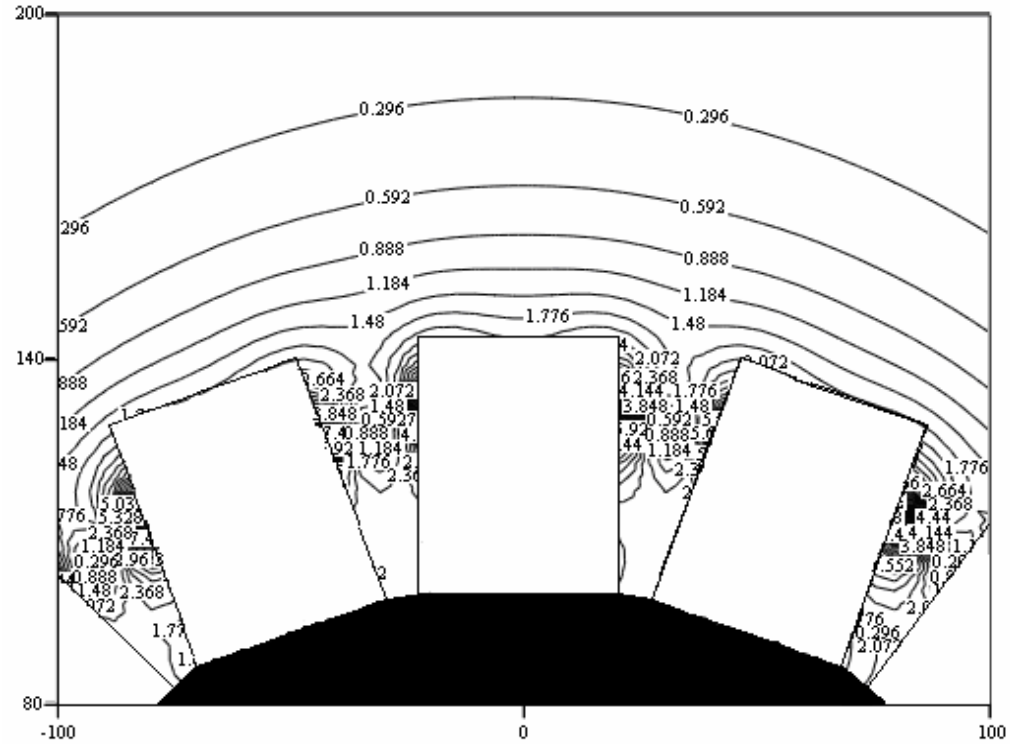

Рис. 1. Картина поля сил

Графики изменения радиальной и тангенциальной составляющих силы в зависимости от радиуса по центру магнита имеют вид (рис. 5).

Сравнение результатов расчета и лабораторных исследований сил дало

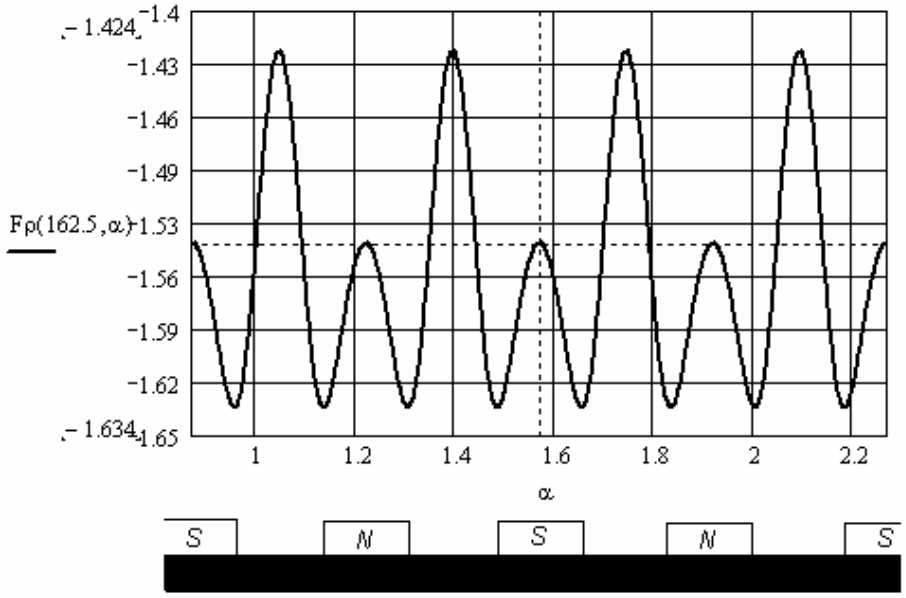

Рис. 3. Графики изменения радиальной составляющей силы на внешней поверхности барабана

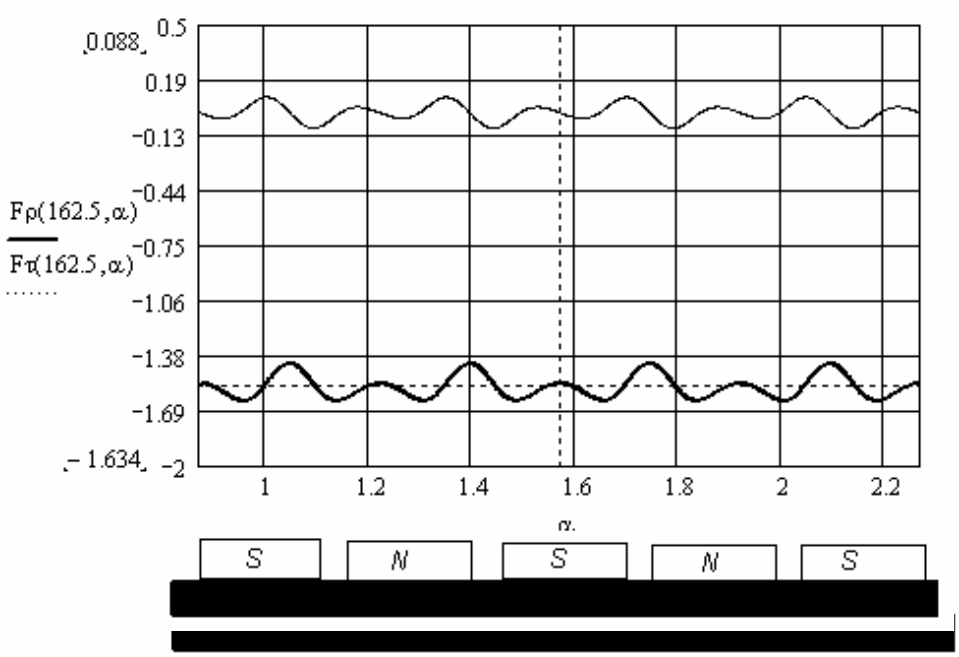

Рис. 4. Графики изменения радиальной и касательной составляющей силы на внешней поверхности барабана

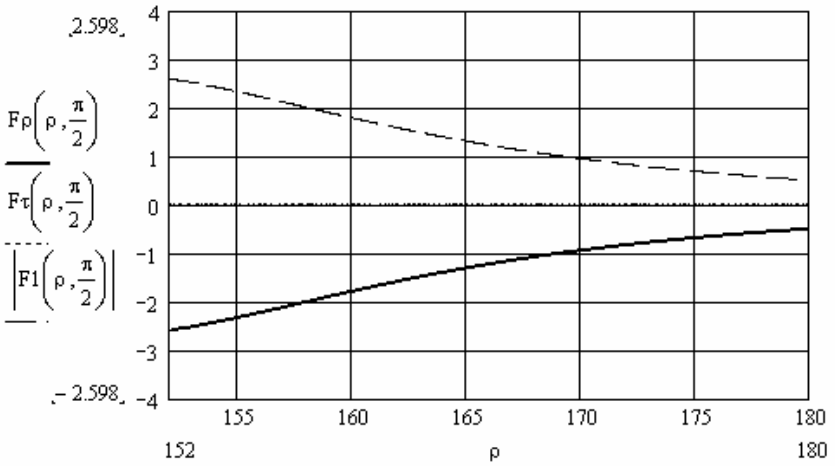

Рис. 5. Графики изменения радиальной и тангенциальной составляющих силы в зависимости от радиуса по центру магнита

совпадение результатов до точности применяемых измерительных приборов. Таким образом, метод аналитического расчета полей сил барабанного сепаратора на постоянных магнитах позволяет с высокой точностью и достоверностью прогнозировать характеристики проектируемых сепараторов.

По результатам исследований полей сил барабанного сепаратора на постоянных магнитах сделаны следующие выводы:

1. Разработана аналитическая методика расчета полей сил барабанного сепаратора на постоянных магнитах.

2. Построена картина поля сил, произведен анализ для исследуемого сепаратора.

3. Выбранная конфигурация магнитной системы и размеры магнитов позволили получить оптимальное поле сип в рабочей зоне сепаратора, где практически нет тангенциальных составляющих сил в полярной системе координат. Отсутствие тангенциальных составляющих сил исключает поступательное движение частиц минералов по поверхности барабана, что уменьшает его истирание.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Кармазин В.В., Кармазин В.И.* Магнитные, электрические и специальные методы обогащения. – М: Изд. МГГУ, 2005.

2. *Епутаев Г.А.* Основы аналитической теории взаимодействия минералов с полем сепаратора на постоянных магнитах. - Владикавказ, РИА, 1999.

Коротко об авторах

Кармазин Виктор Витальевич – академик МИА и РАЕН, профессор, доктор технических наук,
Ковалев Р.В. – аспирант,
Епутаев Г.А. – профессор, доктор технических наук,
Московский государственный горный университет.