

РАЗРАБОТКА МАГНИТНОГО СЕПАРАТОРА НА ОСНОВЕ АНАЛИТИЧЕСКОГО РАСЧЁТА ПОЛЯ ПОСТОЯННЫХ МАГНИТОВ

Асп. *Подковыров И. Ю.*,
канд. техн. наук *Солоденко А. А.*
Кафедра обогащения полезных ископаемых
Северо-Кавказский горно-металлургический институт
(государственный технологический университет)

Разработан мобильный роликовый магнитный сепаратор для выделения парамагнитных минералов. Расчет конструктивных параметров сепаратора выполнен с применением нового аналитического метода моделирования магнитных полей.

Одной из актуальных проблем исследования и переработки минерального сырья является создание мобильного и эффективного оборудования для выделения парамагнитных минералов из мелкозернистых проб геологоразведки и промышленного обогащения концентратов. Весьма перспективным в этом направлении является использование постоянных магнитов из редкоземельных сплавов. Для расчёта магнитных систем из высококоэрцитивных современных материалов целесообразно использовать аналитический метод, разработанный в СКГМИ [1-3].

Основой метода является выражение комплексного потенциала простого слоя тока с источниками, имеющими линейную плотность $\rho(\xi)$

$$f(z) = \frac{1}{2\pi j} \int_L \rho(\xi) Lnr dl, \quad (1)$$

где $z = x + jy$ – координата комплексной плоскости; ξ – координата точки на линии контура магнита L ; $r = |\xi - z|$. Из граничных условий для магнитной индукции и векторного магнитного потенциала при $M(z) = \text{Const}$ следует что:

$$\rho(\xi) = M \cos(\varphi - \psi) \quad (2)$$

где M – модуль вектора намагничивания; φ, ψ – угол между векторами ξ, M и осью x -ов.

Используя интегральные формы Коши и теоремы Сохотского об их преобразовании, определили, что для одной стороны магнита:

$$\omega(z) = \frac{\mu_0}{2\pi j} M \cdot \cos(\varphi - \psi) \int_L Ln(\xi - z) dl, \quad (3)$$

$$B^*(z) = j \frac{\partial \omega(z)}{\partial \xi} = \frac{\mu_0}{2\pi} M \cdot \cos(\varphi - \psi) \int_L \frac{d\xi}{\xi - z}. \quad (4)$$

Например, параметры i -й стороны магнита, сечение которого многоугольник с вершинами $Z_1, Z_2, Z_3, \dots, Z_i, \dots, Z_n$ описывается как $\xi = Z_i + t(Z_{i+1} - Z_i)$, откуда $d\xi = (Z_{i+1} - Z_i)dt$ где t – формальная действительная переменная. Ориентация сторон магнита определена величиной $\cos(\varphi - \psi)$: через координаты i -сторон:

$$\cos(\varphi - \psi) = \cos \varphi \cdot \cos \psi + \sin \varphi \cdot \sin \psi = (1/|Z_{i+1} - Z_i|) \times \\ \times \left[(Z_{i+1} + Z_{i+1}^* - Z_i - Z_i^*) \cos \varphi + j(Z_{i+1} - Z_{i+1}^* + Z_i + Z_i^*) \sin \psi \right],$$

где φ и ψ определяют направление сторон магнита и его намагниченности относительно оси ОХ. Тогда для i -сторон магнита:

$$\omega(Z) = \frac{\mu}{4\pi} M \times \left[(Z_{i+1} + Z_{i+1}^* - Z_i - Z_i^*) \cos \varphi + j(Z_{i+1} - Z_{i+1}^* + Z_i + Z_i^*) \sin \psi \right] \times \int_0^1 \ln \left[(Z_i - Z) + t(Z_{i+1} - Z_i) \right] dt, \quad (5)$$

откуда:

$$\omega(Z) = \frac{\mu}{4\pi} M \left[\left(1 + \frac{Z_{i+1}^* - Z_i^*}{Z_{i+1} - Z_i} \right) \cos \varphi + j \left(\frac{Z_{i+1}^* - Z_i^*}{Z_{i+1} - Z_i} - 1 \right) \sin \psi \right] \times \left[(Z_{i+1}) \ln(Z_{i+1} - Z) - (Z_i - Z) \ln(Z_i - Z) \right]. \quad (6)$$

Для определения расчетных параметров всего магнита выражение (6) суммируется по числу сторон магнита. Для одного, горизонтально расположенного по оси X-ов магнита:

$$\omega(z) = \frac{\mu M}{2\pi} \left\{ (z - z_0^*) \ln(z - z_0^*) - (z - z_0) \ln(z - z_0) - (z - z_1^*) \ln(z - z_1^*) + (z - z_1) \ln(z - z_1) \right\}, \quad (7)$$

где a, b, l_0 – геометрические параметры магнитной системы, M – намагниченность магнита, $z = x + iy$ – комплексная координата, $z_0 = l_0 - b + ia$, $z_1 = l_0 + b + ia$, $i = \sqrt{-1}$, z^* и z_1^* – сопряженные комплексные переменные к z_0 и z_1 . Имея ввиду, что $z = x + iy = \rho e^{i\psi}$:

$$(z + z_0) \ln(z + z_0) = (\rho e^{i(\varphi + \psi)} + \rho e^{i\varphi_0}) \ln(\rho e^{i(\varphi + \psi)} + \rho e^{i\varphi_0}), \text{ где } \rho = \sqrt{x^2 + y^2},$$

$$\text{т.е. } \rho_0 = \sqrt{(l_0 - b)^2 + a^2}, \quad \rho_1 = \sqrt{(l_0 + b)^2 + a^2},$$

$$\varphi_0 = \arctg \frac{a}{l_0 - b}, \quad \varphi_1 = \arctg \frac{a}{l_0 + b}, \quad (8)$$

получаем выражение комплексного магнитного потенциала в межполюсном пространстве системы двух магнитов. Составляющую вектор-потенциала по оси z находим как мнимую часть от комплексного магнитного потенциала ($A_z = Im\omega$), имея в виду, что:

$$\begin{aligned} & \text{Im}(z + z_0) \ln(z + z_0) = \\ & = (\rho \sin(\varphi + \psi) + \rho_0 \sin \varphi_0) \ln(\rho^2 + 2\rho\rho_0 \cos(\varphi + \psi - \varphi_0) + \rho_0^2) + \\ & + \rho_0^2 + 2(\rho \cos(\varphi + \psi) + \rho_0 \sin \varphi_0) - \\ & - \arctg \frac{\rho \sin(\varphi + \psi) + \rho_0 \sin \varphi_0}{\rho \cos(\varphi + \psi) + \rho_0 \sin \varphi_0}. \end{aligned} \quad (9)$$

Учитывая, что $\vec{H} = \frac{1}{\mu_0} \text{rot} \vec{A}_z$ и в полярной системе $H_\varphi = -\frac{1}{\mu_0} \cdot \frac{\partial A_z}{\partial \rho}$.

В выражение для H_φ подставляем $\varphi = \pi/2$ и получаем аналитическое выражение напряжённости поля по оси симметрии между двух магнитов:

$$\begin{aligned} H = 2K \{ & \cos \psi [\ln(\rho^2 - 2\rho\rho_0 \sin(\psi - \varphi_0) + \rho_0^2) - \ln(\rho^2 - \\ & - 2\rho\rho_0 \sin(\psi + \varphi_0) + \rho_0^2) - \ln(\rho^2 - 2\rho\rho_1(\psi - \varphi_1) + \rho_1^2) + \ln(\rho^2 - \\ & - 2\rho\rho_1 \sin(\psi + \varphi_1) + \rho_1^2)] + 2 \sin \psi \left[\arctg \frac{\rho \cos \psi + \rho_0 \sin \varphi_0}{\rho \sin \psi - \rho_0 \cos \varphi_0} - \right. \\ & \left. - \arctg \frac{\rho \cos \psi - \rho_0 \sin \varphi_0}{\rho \sin \psi - \rho_0 \cos \varphi_0} - \arctg \frac{\rho \cos \psi + \rho_1 \sin \varphi_1}{\rho \sin \psi - \rho_1 \cos \varphi_1} + \right. \\ & \left. + \arctg \frac{\rho \cos \psi - \rho_1 \sin \varphi_1}{\rho \sin \psi - \rho_1 \cos \varphi_1} \right] \}. \end{aligned} \quad (10)$$

Коэффициент K определяется по заданной величине напряженности магнитного поля в центре полюса магнита, расположенного вне магнитной системы.

Градиент напряженности магнитного поля по оси симметрии находится дифференцированием последнего выражения по оси OZ . Для вычисления величин H , $\partial H/\partial \rho$ на ЭВМ составлена программа расчета.

Результирующая магнитная сила, действующая на единицу объема тела в среде определяется формулой:

$$F_T = f_T \cdot N = \mu_0 I \nabla B, \quad (11)$$

где χ_t , χ_c – удельная магнитная восприимчивость тела и среды.

Распределение сил, создаваемых полем постоянных магнитов определяется после раскрытия градиента магнитной индукции (∇B) в декартовой системе координат:

$$\begin{aligned} f_m = I \left(\frac{\partial B^o}{\partial x} i + \frac{\partial B^o}{\partial y} j \right) = \mu_0 I \left[\left(\frac{\partial B^o}{\partial x} \cos \alpha + \frac{\partial B^o}{\partial y} \sin \alpha \right) i + \right. \\ \left. + \left(\frac{\partial B^o}{\partial y} \cos \alpha + \frac{\partial B^o}{\partial x} \sin \alpha \right) j \right], \end{aligned} \quad (12)$$

где I – намагниченность вещества;

α – угол между вектором B и осью X -ов.

Составляющие B_x^o и B_y^o определяются из выражения (10) с учётом намагниченности вещества. Производные магнитной индукции определяются дифференцированием. Например, для магнита четырехугольного сечения

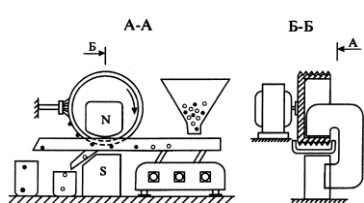
$$\frac{\partial B_x}{\partial x} = \frac{\mu_0}{4\pi} M \times \left\{ \left[\frac{-K_1(x_2 - x_1) + K_2(y_2 - y_1)}{(x_2 - x)^2 + (y_2 - y)^2} + \frac{K_1(x_1 - x) - K_2(y_2 - y)}{(x_1 - x)^2 + (y_1 - y)^2} \right] + \left[\frac{K_3(x_4 - x) + K_4(y_4 - y)}{(x_4 - x)^2 + (y_4 - y)^2} + \frac{K_3(x_3 - x) - K_4(y_3 - y)}{(x_3 - x)^2 + (y_3 - y)^2} \right] \right\}, \quad (13)$$

где $K_1 = \cos(\psi_1 - 2\varphi_1) + \sin\psi$; $K_3 = -K_2$; $K_4 = K_1$;

$$\sin \alpha = \sin \left(\arctg \frac{B_x}{\sqrt{B_x^2 + B_y^2}} \right); \quad \cos \alpha = \cos \left(\arctg \frac{B_x}{\sqrt{B_x^2 + B_y^2}} \right).$$

Аналогично определяется B_y .

Используя описанный метод, рассчитаны основные параметры замкнутой системы постоянных магнитов для роликового магнитного сепаратора. Конструктивная схема и общий вид сепаратора представлены на рисунке. Для создания максимальной индукции в рабочей зоне магниты расположены в непосредственной близости от лотка, то есть в самом ролике и под лотком. Магнитная система замкнута магнитопроводом. Зубчатая поверхность ролика создает высокоградиентное поле в рабочей зоне, что повышает извлекающую магнитную силу. Это является главным отличием разработанной схемы от известных конструкций индукционных роликовых сепараторов.



Роликовый магнитный сепаратор.

Магнитный сепаратор состоит из: приемного бункера, рабочего лотка, электромагнитного вибратора, рабочего ролика, электромотора, магнитной системы, приемников продуктов сепарации.

Принцип действия аппарата заключается в следующем. Навеску исходного материала загружают в приемный бункер. Ролик магнитного сепаратора вращается, а лоток совершает возвратно-поступательные колебания. Материал под действием вибрации движется по дну лотка. В зоне межполюсного пространства магнитной системы слабомагнитные (парамагнитные) частицы под воздействием магнитного поля отрываются от дна вибрлотка и прилипают к поверхности ролика. Это обусловлено конфигурацией поверхностей ролика и нижнего полюса магнитной системы. При выходе из межполюсного зазора сила притяжения частиц к ролику уменьшается, и частицы отрываются от него, снова попадая на вибрлоток, посредством которого разгружаются в приемник. Отрыву частиц от поверхности ролика способствует магнитомягкий материал, из которого ролик изготовлен, а также съемные щетки. Немагнитные частицы, перемещаясь по вибрлотку, через щель в лотке разгружаются в приемник.

При настройке режима магнитной сепарации ее оптимизацию осуществляют изменением параметров магнитного поля в рабочей зоне и интенсивности колебаний вибрлотка. Требуемые параметры магнитного поля в рабочей зоне сепаратора задают изменением расстояния между роликом и полюсом магнитной системы. Нагрузку по питанию регулируют силой тока в катушках электромагнитного вибратора, изменяя интенсивность колебаний вибрлотка.

Испытания созданного аппарата в геологоразведочных партиях, исследовательских лабораториях, а также в составе шлиходоводочных установок [2] подтвердили его высокую эффективность при выделении парамагнитных минералов

ЛИТЕРАТУРА

1. *Солоденко А. Б.* Аналитический метод расчета параметров магнитного поля ив МГ сепараторе на постоянных магнитах// Изв. ВУЗов. Цвет. мет. 1991. №2. С. 5-10.
2. *Кузнецов С. М.* Исследование и разработка математических моделей полей постоянных магнитов для электрических САПР. Автореф. дис. ... к.т.н. СКГТУ. Владикавказ, 1997. 23 с.
3. *Епугаев Г. А., Солоденко А. Б., Данилова М. Г.* Расчет полей постоянных магнитов на основе интегралов Коши и типа Коши // Труды СКГТУ. 1966. Вып. 2. С. 136.
4. *Паньшин А. М., Евдокимов С. И., Солоденко А. А.* Минералургия. Золото: теория и промысел. Т 1. Владикавказ: ООО НПК «Мавр», 2010. 955 с.