

УДК 622.778:621.928

Е.Я. Тагунов, П.Е. Тагунов, В.В. Кармазин

РАСЧЕТ МАГНИТНОГО ПОЛЯ В РАБОЧЕЙ ОБЛАСТИ ВЫСОКОГРАДИЕНТНОГО БАРАБАННОГО ШАРИКОВОГО СЕПАРАТОРА НА ПОСТОЯННЫХ МАГНИТАХ

Произведен расчет магнитного поля в рабочей области высокоградиентного барабанного шарикового сепаратора на постоянных магнитах. Полученные аналитические выражения для индукции возбуждения магнитного поля позволяют оптимизировать параметры магнитной системы сепаратора с целью повышения эффективности его работы.

Ключевые слова: шариковый сепаратор, высокоградиентная сепарация, полиградиентная сепарация, магнитное поле, полиградиентная среда, шариковая среда, высокоградиентное магнитное поле.

Высокоградиентный барабан-ный шариковый сепаратор предназначенный для мокрого магнитного обогащения слабомагнитных руд относится к разряду сепараторов с контактными полиградиентными средами [1, 2]. Поперечный разрез сепаратора представлен на рис. 1. Исходное питание в виде пульпы из питающего короба поступает в рабочую зону сепаратора через верхнюю часть вращающегося барабана 1, на сформированный из стальных шариков слой полиградиентной среды 2. Магнитный поток, проходящий через слой полиградиентной среды, создаётся расположенной внутри барабана неподвижной магнитной системой из магнитных блоков 3. Магнитные блоки изготавливаются на основе постоянных высокоэнергетичных магнитов, установленных на обойме 4. Магнитный поток выводится в рабочую зону на поверхности барабана через сегментные магнитопроводящие концентраторы 5 и реборды 6. На этой поверхности в магнитном поле стальные шарики образуют объемную пористую структуру с множеством центров дей-

ствия высоко-градиент-ных магнитных сил в точках взаимного касания шариков.

Частицы обогащаемого сырья, не обладающие магнитными свойствами, свободно проходят (фильтруются) через слой шариков в зону разгрузки немагнитного продукта - хвостов. Частицы с выраженной магнитной восприимчивостью притягиваются магнитными силами во множестве локальных участков пространства вблизи точек касания шариков и перемещаются с вращающимся барабаном, сначала в зону промывки в магнитном поле, где отделяются немагнитные, механически захваченные частицы, а затем в зону смыва концентрата и регенерации полиградиентной среды. В этой зоне магнитное поле отсутствует, шарики свободно скатываются по наклонным перфорированным поверхностям типа сит 7. При этом они интенсивно омываются водой, освобождаясь от налипших частиц магнитного продукта — концентрата. Смывый с шариков магнитный продукт, пройдя через отверстия сит поступает в концентратный лоток.

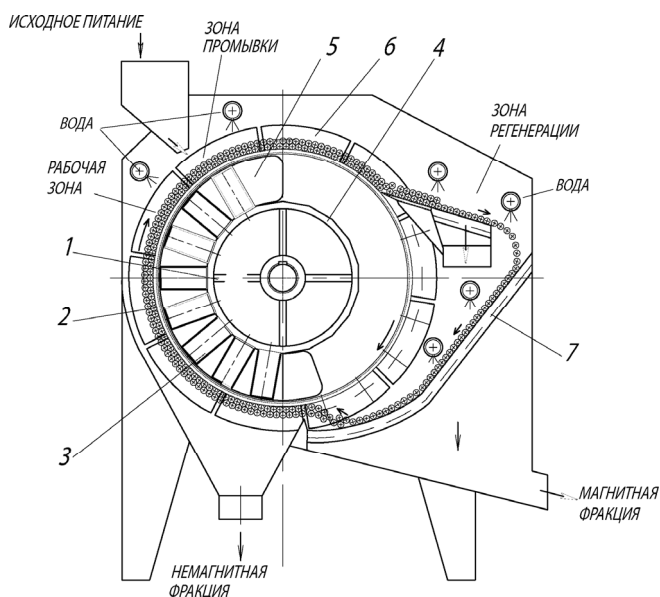


Рис. 1. Поперечный разрез шарикового сепаратора

Из двух типов магнитных систем (рис. 2), которые могут быть использованы для создания возбуждающего магнитного поля в полиградиентной среде, была выбрана магнитная система типа (b).

В ней горизонтально намагниченные блоки расположены на немагнитном ядре, а ферромагнитные проставки, между блоками, намагничены в противоположных направлениях, играют роль полюсов системы и концентраторов магнитного потока. Реборды на поверхности обечайки выводят магнитный поток в рабочее пространство и обеспечивают равные условия для прохождения потока по нижним и верхним слоям шаров.

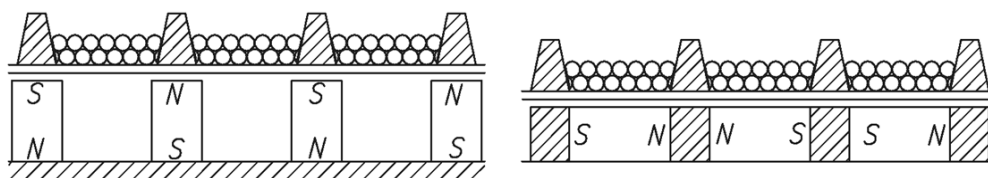


Рис. 2. Варианты магнитных систем

Главным преимуществом системы с горизонтально намагниченными блоками является большая однородность магнитного поля по сечению рабочего пространства. Наиболее простые аналитические оценки характеристик магнитного поля такой системы могут быть получены на основе эквивалентной схемы, изображенной на рис. 3, где полиградиентная среда заменена участком магнитопровода длины l , магнитная проницаемость μ_1 в котором постоянна по всему его сечению.

В пренебрежении полями рассеяния и предположении малости величины падения магнитного напряжения в ферромагнитных концентраторах и ребордах на основе стандартных методов расчета магнитных цепей [3] получаем соотношения

$$H_m L + H_1 l + H_\delta 2\delta_0 = 0 \quad (1)$$

$$\Phi = B_m S_m = \mu_1 \mu_0 H_1 S_1 = \mu_0 H_\delta S_\delta$$

где H_m , H_1 , и H_δ - напряженности магнитного поля в магнитном материале, магнитопроводе и зазоре соответственно, B_m - магнитная индукция в магнитном материале, S_m , S_1 и S_δ площади сечения магнита, магнитопровода и зазора соответственно, L и l - протяженность магнитного

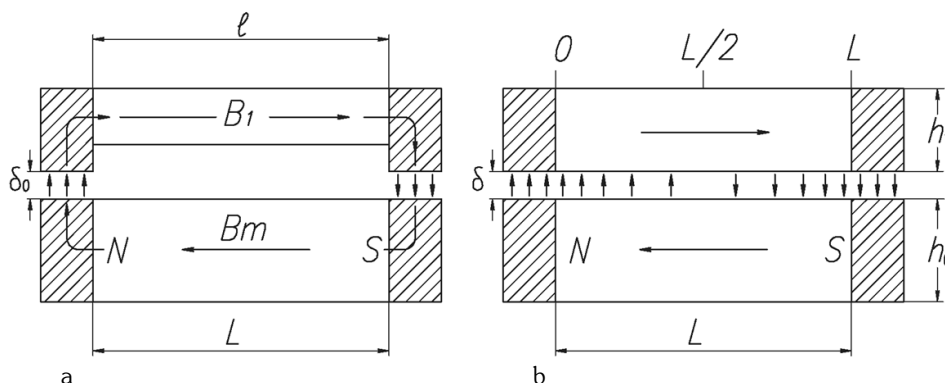


Рис. 3. Эквивалентная схема магнитной системы

блока и участка рабочей области между соседними ребрами соответственно.

Из (1) получаем

$$H_m(B_m) = - \left[\frac{lS_m}{\mu_1 \mu_0 L S_1} + \frac{2\delta_0 S_m}{\mu_0 L S_\delta} \right] B_m \quad (2)$$

Уравнение (2) обычно решается графическим способом с использованием реальной кривой размагничивания магнитного материала, что позволяет определить значения H_r и B_r , как это показано на рис. 4.

Для получения приближенных аналитических оценок представим кривую размагничивания отрезком прямой, проходящим через точки $(-H_{cb}, 0)$ и $(0, B_r)$, полагая

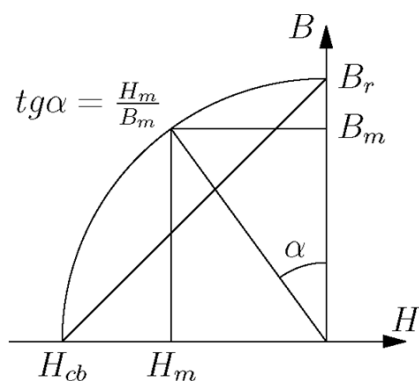


Рис. 4. Определение положения рабочей точки магнитного материала

$$B_m = \frac{B_r}{H_{cb}} H_m + B_r \quad (3)$$

что позволяет получить следующие выражения для индукции B_1 в рабочей области (её часто называют индукцией возбуждения)

$$B_1 = \frac{\Phi}{S_1} = \frac{S_m}{S_1} \frac{B_r}{1 + \frac{1}{\mu_1} \frac{l}{L} \frac{S_m}{S_1} \gamma + \frac{2\delta_0}{L} \frac{S_m}{S_\delta} \gamma} \quad (4)$$

$$\text{где } \gamma = \frac{B_r}{\mu_0 H_{cb}}.$$

Более точные оценки должны строиться с учетом полей рассеяния магнитного поля. Близость рабочего пространства, заполненного ферромагнитными шарами, к поверхности магнитных блоков приводит к тому, что вклад полей рассеяния (рис. 3 (b)) в возбуждающий магнитный поток становится значительным. Для получения аналитических результатов введем следующие предположения. Во-первых, предположим, что магнитный поток как в магнитном блоке, так и в рабочей области однороден по поперечному сечению и направлен параллельно оси x , т.е. напряженности магнитного поля $H_1(x)$ и $H_r(x)$ (в рабочей области и магнитном материале соответственно) являются функциями координаты x . Во-вторых, считаем, что основные потоки рассеяния замы-

каются через зазор δ , формируя в этом зазоре магнитное поле, напряженность которого направлена перпендикулярно оси x . Величину напряженности поля в зазоре обозначим $H_\delta(x)$. При этом изменения магнитного потока как в магнитном блоке, так и в рабочей области обусловлены в основном потоком рассеяния, замыкающимся через зазор между магнитом и магнитопроводом, в то время как влияние других потоков рассеяния на эти величины пренебрежимо мало. Так же, как и в первом случае, заменяем реальную кривую размагничивания магнитного материала отрезком прямой, проходящим через точки $(H_{cb}, 0)$ и $(0, B_r)$. Эффекты насыщения в полиградиентной среде учитываем, считая, что эта область заполнена материалом с некоторым эффективным значением магнитной проницаемости μ_1 , определяющей взаимосвязь между магнитной индукцией и напряженностью магнитного поля в соответствии с выражением $B_1 = \mu_0 \mu_1 H_1$.

Приравнивая нулю циркуляцию вектора напряженности магнитного поля и основываясь на непрерывности магнитного потока [4], получаем систему уравнений для H и B :

$$\begin{aligned} \frac{\partial H_\delta(x)}{\partial x} &= \frac{H_m(x) + H_1(x)}{\delta} \\ \frac{\partial H_1(x)}{\partial x} &= \frac{1}{\mu_1 h_1} H_\delta(x) \\ \frac{\partial B_m(x)}{\partial x} &= \frac{\mu_0}{h_0} H_\delta(x) \\ B_m(x) &= \frac{B_r}{H_{cb}} H_m(x) + B_r \\ B_m(x) &= \frac{B_r}{H_{cb}} H_m(x) + B_r \end{aligned} \quad (5)$$

которая приводит к дифференциальному уравнению

$$\frac{\partial^2 H_1(x)}{\partial x^2} - \frac{1}{h_1 \delta \mu_1} \left(1 + \frac{h_1 \mu_1}{\gamma h_0} \right) H_1(x) + \frac{H_{cb}}{h_1 \delta \mu_1} = 0 \quad (6)$$

где $\gamma = \frac{B_r}{\mu_0 H_{cb}}$.

Полагая $H_1(0) = 0$ и пренебрегая величинами второго порядка малости

по $\beta = \gamma \frac{h_0}{h_1 \mu_1}$, получаем решение в виде

$$H_1(x) = \frac{h_0}{h_1} \frac{B_r}{\mu_0 \mu_1} \left(1 - \exp \left[-x \sqrt{\frac{\mu_0}{\delta h_0} \frac{H_{cb}}{B_r}} \right] \right) \quad (7)$$

Окончательное выражение для $B_1(x)$ получим методом сшивания решений (4) и (7), принимая во внимание

соотношения $\frac{h_0}{h_1} = \frac{S_m}{S_1}$ и

$B_1 = \mu_0 \mu_1 H_1$, что позволяет записать

$$B_1(x) = \frac{S_m}{S_1} B_1^1 \left(1 - \exp \left[-x \sqrt{\frac{\mu_0}{\delta h_0} \frac{H_{cb}}{B_r}} \right] \right) \quad (8)$$

где $B_1^1 = \frac{B_r}{1 + \frac{1}{\mu_1} \frac{l}{L} \frac{S_m}{S_1} \gamma + \frac{2\delta_0}{L} \frac{S_m}{S_\delta} \gamma}$

На рис. 5 представлены графики $B_1(x)$ на участке $(0, L/2)$, демонстрирующие характер зависимости индукции возбуждения от расстояния для различных величин зазора δ ($\delta_{\max} = 3\delta_{\min}$). При этом начало координат на графике соответствует положению плоскости, проходящей через середину полюса (концентратора) и ферромагнитной реборды. Если принять, что их ширина составляет величину $2a$, то началу рабочей об-

ласти, в которой находится ферромагнитный наполнитель, соответствует точка с координатой $x = a$. При расчетах предполагалось $\mu_0 H_{cb}/B_r \sim 1$, а величина параметра $L/\sqrt{\delta h_0}$ изменялась в пределах от 7 до 12.

Полагая, что зазор δ много меньше размеров магнитного блока можно записать с учетом его геометрии $L \gg \delta$ и $L \geq h_0$, откуда следует, что $L \gg \sqrt{\delta h_0}$. Принимая во внимание, что $\mu_0 H_{cb}/B_r \sim 1$, в точке с координатой $x=L/2$ выражение (8) приходит к виду $B_1(L/2) \sim \frac{S_m}{S_1} B_1^1$, что соответствует принятой модели, в которой основной поток рассеяния замыкается через ферромагнитный наполнитель.

Как видно из полученных результатов, для увеличения индукции магнитного поля в рабочей области необходимо увеличивать отношение h_0/h_1 , т.е. увеличивать высоту магнитных блоков и уменьшать толщину слоя шаров. Однако, толщина слоя шаров напрямую определяет производительность системы и задается, как

правило, изначально. Т.о. для усиления магнитного поля остается только возможность увеличения высоты магнитных блоков. При этом, чем больше величина зазора δ , тем больше должен быть шаг L магнитной системы, с тем, чтобы повысить однородность магнитного поля в рабочей области и, следовательно, обеспечить как можно меньше изменения условий для извлечения магнитного продукта в основной части рабочего пространства системы.

Изначально введенные предположения, сделавшие возможным получение аналитических выражений, приводят к некоторым погрешностям в определении количественных характеристик магнитного поля. В частности, одним из существенных источников ошибок является предположение о линейной зависимости между H и B в рабочей области системы. Так же, как и в случае с расчетами магнитного поля в пространстве между двумя контактирующими шарами, корректные результаты здесь могут быть получены только с помощью численных расчетов, что не мешает использовать полученные аналитические

выражения для оценки влияния различных параметров магнитной системы на формирование возбуждающего магнитного поля. Эти выражения позволяют подбирать оптимальные размеры магнитных блоков, шаг их чередования, величины зазоров, характеристики магнитного материала и т.д. В конечном итоге при заданной величине рабочего объема сепаратора рассчитываются параметры магнитной сис-

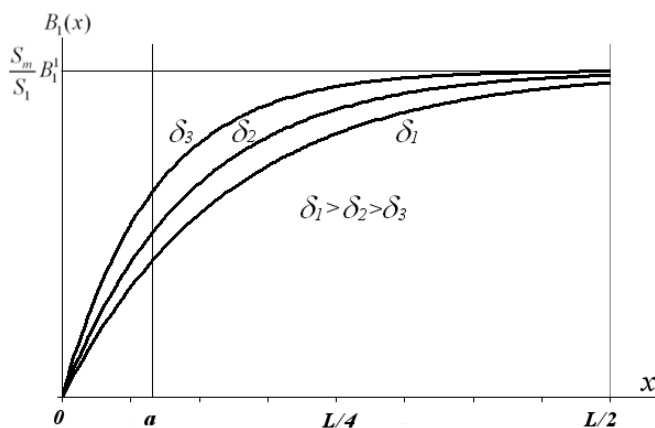


Рис. 5. График изменения индукции поля $B_1(x)$ на участке $(0, L/2)$

темы, обеспечивающие необходимую величину индукцию возбуждения магнитного поля в полигради-

ентной среде, определяющую эффективность извлечения слабомагнитной фракции.


СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Кармазин В.В., Кармазин В.И. Магнитные, электрические и специальные методы обогащения полезных ископаемых. (Т.1. Магнитные и электрические методы обогащения полезных ископаемых) М.: Изд-во МГГУ, 2005, 669 с.

2. Jan Svoboda. Magnetic Techniques for the Treatment of Materials. Dordrecht, Boston:

Kluwer Academic Publishers, 2004, 656 p.

3. Бинс К., Лоуренс П. Анализ и расчет электрических и магнитных полей. М.: Энергия, 1970.

4. Тамм И.Е. Основы теории электричества. 10-е изд., испр.. М.: Наука. Гл. ред. физ.-мат. лит., 1989, 504 с. 

КОРОТКО ОБ АВТОРАХ

Тагунов Евгений Яковлевич – кандидат физико-математических наук, доцент, tagunov@magnetite.ru, «МАГНЕТИТ»,

Тагунов Петр Евгеньевич – аспирант, peter.tagunov@fe3o4.com

Кармазин Виктор Витальевич - доктор технических наук, профессор, академик МИА и РАН, karmazin@mail.ru

Московский государственный горный университет.



РУКОПИСИ, ДЕПОНИРОВАННЫЕ В ИЗДАТЕЛЬСТВЕ «ГОРНАЯ КНИГА»

ТЕРМОГАЗОДИНАМИЧЕСКИЙ АНАЛИЗ ПРОЦЕССА СУШКИ ЧАСТИЦ БУРОГО УГЛЯ В ТЕХНОЛОГИЧЕСКОЙ УСТАНОВКЕ БРИКЕТИРОВАНИЯ

(862/02-12 от 12.12.11, 8 с.)

Васенин Игорь Михайлович, зав. кафедрой, доктор физико-математических наук, профессор, Национальный исследовательский Томский государственный университет, тел. 8-3822-529-734,

Исайченков Александр Борисович, начальник отдела технологии открытых горных работ, ОАО «СУЭК», IsaychenkovAB@suek.ru

Крайнов Алексей Юрьевич

Представлена физико-математическая модель сушки частиц угля в вертикальной сушильной трубе потоком горячего газа. Представлены результаты численного анализа процесса сушки. Модель может быть использована для оценки параметров сушильного устройства.

Ключевые слова: сушка, математическая модель, численное решение, частицы угля, параметры устройства.

THERMO- AND GAS-DYNAMIC ANALYSIS OF PROCESS OF DRYING OF PARTICLES OF BROWN COAL IN THE TECHNOLOGICAL INSTALLATION BRIQU

Vasenin I.M., Isaychenkov A.B., Krajnov A.Y.

Presented physical-mathematical model of drying coal particles in a vertical drying tube hot gas stream. The results of numerical analysis of the drying process. The model can be used to estimate the parameters of the drying unit.

Key words: drying, mathematical model, numerical solution, the particles of coal, the device settings.