

УДК: 517.958:537.812

## НЕКОТОРЫЕ ВОПРОСЫ ПОЛИГРАДИЕНТНОЙ МАГНИТНОЙ СЕПАРАЦИИ

**С. Т. Толмачев, С. Л. Бондаревский**

Криворожский национальный университет

ул. XXII Партсъезда, 11, г. Кривой Рог, 50027, Украина. E-mail: kafem@mail.ru

Рассмотрены вопросы анализа силовых полей магнитных сепараторов. Проанализированы основные факторы, определяющие формирование структуры силового поля фильтр-матриц полиградиентных сепараторов. Выполнен анализ влияния характерных размеров элементов фильтра и сепарируемых частиц на извлекающую способность сепаратора. Обсуждаются также некоторые вопросы повышения точности расчета силовых характеристик поля.

**Ключевые слова:** полиградиентная сепарация, силовое поле, матрица.

## ДЕЯКІ ПИТАННЯ ПОЛІГРАДІЄНТНОЇ МАГНІТНОЇ СЕПАРАЦІЇ

**С. Т. Толмачов, С. Л. Бондаревський**

Криворізький національний університет

вул. XXII Партз'їзду, 11, м. Кривий Ріг, 50027, Україна. E-mail: kafem@mail.ru

Розглянуто питання аналізу силових полів магнітних сепараторів. Проаналізовано основні фактори, що визначають формування структури силового поля фільтр-матриць поліградієнтних сепараторів. Виконано аналіз впливу характерних розмірів елементів фільтра і часток, що сепаруються, на вилучальну здатність сепаратора. Обговорюються також деякі питання підвищення точності розрахунку силових характеристик поля.

**Ключові слова:** поліградієнтна сепарація, силове поле, матриця.

**АКТУАЛЬНОСТЬ РАБОТЫ.** Магнитная сепарация является одной из наиболее широко применяемых технологий обработки материалов, чувствительных к неоднородному магнитному полю. Широкое распространение магнитной сепарации обусловлено рядом её преимуществ: возможностью изменения магнитных сил в широком диапазоне, сравнительно простой реализацией комбинированного воздействия на материалы путём использования сил другой физической природы, большим диапазоном гранулометрических и магнитных свойств сепарируемых материалов, экологической чистотой технологии и возможностью её применения в регионах с различными климатическими условиями и т.д.

Наиболее бурное развитие магнитной сепарации приходится на вторую половину прошлого столетия, когда эта технология прошла этап эволюции от сравнительно простой магнитной обработки сильномагнитных крупнозернистых материалов до значительно более сложной технологии сепарации тонкодисперсных слабомагнитных частиц. Реализация этой технологии требовала увеличения на два-три порядка магнитных сил. Повышение плотности тока обмоток за счет их эффективного охлаждения, применение сверхпроводящих магнитных систем, разработка высокоэнергетических постоянных магнитов частично способствовали прогрессу в данной области, но не обеспечили революционного прорыва. Другим существенным этапом в развитии магнитной сепарации слабомагнитных руд стала технология высокоградиентной магнитной сепарации, когда одновременное локальное усиление поля и его градиента достигалось в так называемых фильтр-матрицах [1, 2]. Развитие этой технологии способствовало созданию уникальных магнитных сепараторов (Джонса, SALA Magnetics, VMS и др.) [3]. С другой стороны, были предприняты многочисленные попытки математического моделирования локальных магнитных полей, синтеза геометрии элементов фильтр-матриц, прогноза извлекающей способности сепараторов [1, 2, 4–6].

К сожалению, присущая процессу полиградиентной сепарации сложность эвакуации задержанного материала и забивка фильтр-матриц оказались существенным тормозом на пути широкой реализации этой технологии. Тем не менее, безусловная плодотворность идеи побуждает к дальнейшим поискам и разработкам в этой области. В частности, повышение эффективности сепарации достигнуто в роторном сепараторе SLON (Китай) за счет пульсаций гидросмеси в пределах матрицы, возрождения концепции качающейся матрицы в современных сепараторах Capco [3]. Все это говорит о том, что возможности магнитной сепарации далеко не исчерпаны.

Быстрый рост вычислительных возможностей современных компьютеров и создание мощных специализированных программных комплексов обеспечили активное развитие методов математического моделирования. Эти методы активно развиваются и в новом перспективном направлении – магнитной сепараций наночастиц [7, 8]. Нет сомнения, что дальнейшее повышение уровня физических представлений, улучшение качества физического и математического моделирования процессов сепарации будут способствовать расширению области применения этой технологии и повышению ее качества.

**МАТЕРИАЛ И РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ.** *Характеристики силового поля трансформатора.* Этот вопрос следует рассматривать в двух аспектах: 1 – собственно силовое поле сепаратора при отсутствии сепарируемого материала и 2 – поле магнитных сил, которые воздействуют на частицы с заданными геометрическими и физическими параметрами. Следует отметить, что в вопросах терминологии и интерпретации указанных понятий имеются некоторые расхождения, которые могут приводить к существенно отличающимся результатам.

Магнитная сила, действующая на малый объём  $dV$ , определяется выражением [9]

$$dF = \mu_0 (\mathbf{J} \cdot \nabla) H dV, \quad (1)$$

где  $J$  и  $H$  – векторы намагниченности и напряженности внутри объёма  $dV$ . Для малых (относительно масштаба неоднородности поля) частиц объёмом  $V$  плотность силы можно приблизительно считать однородной, поэтому

$$F = \mu_0 V (J \cdot \nabla) H. \quad (2)$$

Выражение (2) наиболее часто используется для двух частных случаев: 1 – когда намагниченность частицы не зависит от напряженности поля в ней ( $J = \text{const}$ , что характерно для однодоменных частиц), и 2 – когда материал частицы предполагается изотропным, а среда рассматривается в линейном приближении, то есть  $J = \kappa H$ , где  $\kappa$  – удельная магнитная восприимчивость материала частицы. Для этих случаев выражение (2) принимает вид

$$F = \mu_0 (M \cdot \nabla) H = \mu_0 M \nabla H = \mu_0 M f_1 \quad (3)$$

и

$$F = \mu_0 \kappa V (H \cdot \nabla) H = \mu_0 \kappa V H \nabla H = \mu_0 \kappa V \frac{1}{2} \nabla (H^2) = \mu_0 \kappa V f_2. \quad (4)$$

Принципиальное различие выражений (3) и (4) состоит в том, что в первом случае магнитные силы направлены перпендикулярно линиям  $H = \text{const}$ , а во втором –  $H^2 = \text{const}$ . Это приводит к существенному различию силового поля, что легко продемонстрировать на простом примере цилиндра, помещенного в однородное магнитное поле напряженностью  $H_0$ . Для цилиндра радиуса  $R$  с магнитной проницаемостью  $\mu_R$  в произвольной точке  $M(r, \alpha)$  вне цилиндра [10]

$$H_r = H_0 \left( \lambda \frac{R^2}{r^2} + 1 \right) \cos \alpha; \quad (5)$$

$$H_\alpha = H_0 \left( \lambda \frac{R^2}{r^2} - 1 \right) \sin \alpha, \quad \lambda = \frac{\mu_R - 1}{\mu_R + 1}.$$

Обозначая  $A = \lambda \frac{R^2}{r^2}$  и учитывая, что в полярных

координатах  $\nabla = i_r \frac{\partial}{\partial r} + i_\alpha \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial \alpha}$ , из выражений (5)

получаем:  
при  $J = \text{const}$

$$f_{1r} = -\frac{2}{r} \frac{H_0 A (A + \cos 2\alpha)}{\sqrt{A^2 + 1 + 2A \cos 2\alpha}}; \quad (6)$$

$$f_{1\alpha} = -\frac{2}{r} \frac{H_0 A \sin 2\alpha}{\sqrt{A^2 + 1 + 2A \cos 2\alpha}}, \quad (7)$$

при  $\kappa = \text{const}$

$$f_{2r} = -\frac{2H_0^2}{r} A (A + \cos 2\alpha); \quad f_{2\alpha} = -\frac{2H_0^2}{r} A \sin 2\alpha. \quad (8)$$

Для оценки силового поля сепаратора на практике можно использовать введенные в (3), (4) функции координат точки

$$f_1 = \nabla H; \quad f_2 = \nabla \frac{H^2}, \quad (9)$$

а также магнитную силовую функцию (по терминологии [7])

$$G_B = \nabla \frac{B^2}{2\mu_0} = \mu_0 f_2. \quad (10)$$

Эти характеристики зависят от геометрических особенностей элементов, формирующих неоднородное магнитное поле, и от интенсивности внешнего поля. Например, для рассмотренного выше случая одиночного цилиндра в однородном внешнем поле напряженностью  $H_0$  максимальные значения силовых функций достигаются при  $r=R$ ,  $\alpha=0$ ,  $\lambda=1$  и соответственно равны:

$$f_{1\text{max}} = \frac{2H_0}{R}; \quad f_{2\text{max}} = \frac{4H_0^2}{R}; \quad G_{B\text{max}} = \frac{4\mu_0 H_0^2}{R}. \quad (11)$$

Как следует из выражений (6) и (7), силовые характеристики сепараторов мало зависят от магнитных свойств материала стержней, например, при  $\mu_R=100$ ,  $\lambda=A=0,9802$  и  $f_1 = 1,9604H_0R^{-1}$ ,  $f_2 = 3,882H_0^2R^{-1}$ , что мало отличается от приведенных в (11) значений. Из этого следует, что магнитные свойства материала слабо влияют на силовое поле. Более существенное влияние оказывают геометрия стержней и их размеры. Очевидно, что при одинаковой интенсивности внешнего поля магнитные силы обратно пропорциональны абсолютным размерам элементов (11), формирующих неоднородное поле. Этот вывод имеет универсальный характер и относится как к двух-, так и к трехмерным элементам матрицы при произвольных их концентрации и форме. Другими словами, существует закон подобия для произвольной ненасыщенной фильтр-матрицы: если при сохранении параметров внешнего поля уменьшить (увеличить) в  $k$  раз размеры матрицы и её элементов, то в соответствующих точках магнитные силы увеличатся (уменьшатся) также в  $k$  раз. Именно это обстоятельство и было главной причиной уменьшения абсолютных размеров элементов фильтр-матриц при создании полиградиентных сепараторов для обогащения слабомагнитных руд.

*Силовое поле одиночного цилиндра.* Рассмотрим в качестве иллюстрации (рис. 1–3) некоторые топологические особенности силовых функций  $f_1$  и  $f_2$ , определяемых соотношениями (6)–(8).

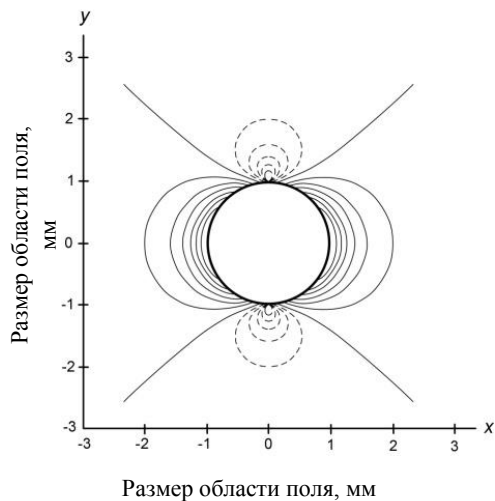


Рисунок 1 – Линии  $f_{1r} = \text{const}$

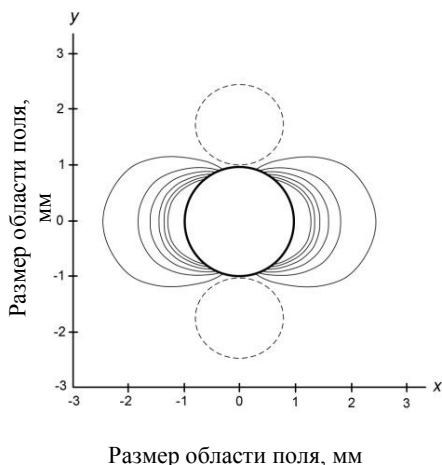


Рисунок 2 – Линии  $f_2=const$

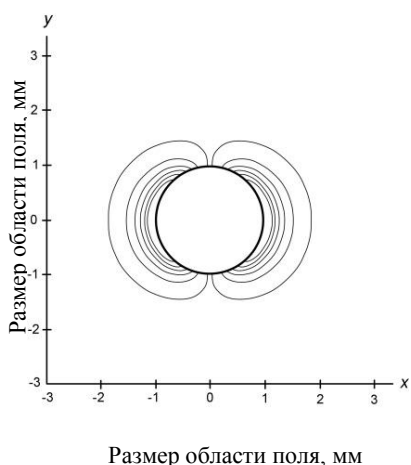


Рисунок 3 – Линии  $f_2=const$

Как видно из рис. 1 и 2, радиальные компоненты силовых функций  $f_1$  и  $f_2$  имеют зоны отталкивающих сил (показаны пунктиром). На рис. 3 приведены изолинии  $f_2=const$ , которые при определенных условиях можно использовать для оценки извлекающей способности матрицы. Характерно, что изолинии  $f_1=const$  представляют собой концентрические окружности  $r=const$ , что нетрудно установить из соотношений (6) и (7). Из этого, конечно, не следует изотропия функции  $f_1$  относительно полярного угла  $\alpha$ : изолинии нечувствительны к знакам составляющих сил, что требует известной осторожности при их использовании.

Наиболее информативным является пространственное распределение силовых функций  $f_1$  и  $f_2$ , приведенных на рис. 4 и 5. Следует обратить внимание на более выраженное «выталкивающее» действие функции  $f_1$  и более однородное по интенсивности силовое поле вблизи поверхности цилиндра по сравнению с функцией  $f_2$ . Можно предположить, что при прочих равных условиях частицы с  $J=const$  в окрестности цилиндра извлекаются или удерживаются легче, чем частицы с  $\kappa=const$ .

Рассмотрим теперь поведение сферической частицы радиуса  $a$ , расположенной на совпадающей с направлением внешнего поля оси цилиндра. Примем

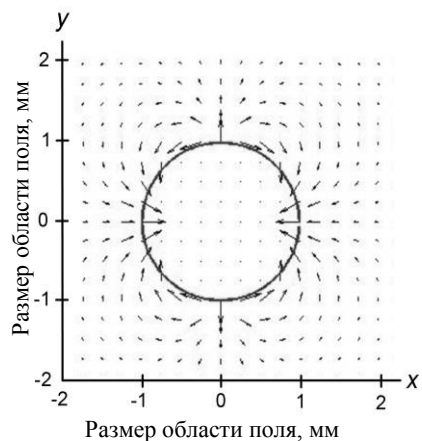


Рисунок 4 – Вектор-функция  $f_1$

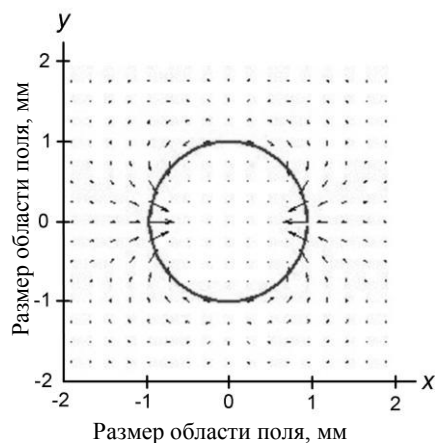


Рисунок 5 – Вектор-функция  $f_2$

за основу модель силового поля (4). Траектория движения частицы  $r(t)$  описывается законом Ньютона:

$$V\rho \frac{dv}{dt} = F_m + F_g + F_c; \quad v = \frac{dr}{dt}. \quad (12)$$

Здесь  $F_m, F_g, F_c$  – соответственно магнитная, гравитационная и гидродинамическая силы:

$$F_m = V\mu_0\kappa f_2 = V\kappa G_B; \quad (13)$$

$$F_g = V(\rho - \rho_c)g = V\rho(1 - k_c); \quad (14)$$

$$F_c = 6\pi a\eta(u - v), \quad (15)$$

где  $V = 4\pi a^3/3$  – объем частицы,  $\rho$  – её плотность,  $k_c = \rho_c/\rho$  – коэффициент плотности среды.

Для удобства введем удельные (на единицу массы частицы) силы

$$f_m = F_m/V\rho = \mu_0\chi f_2, \quad \chi = \kappa/\rho; \quad (16)$$

$$f_g = F_g/V\rho = (1 - k_c)g; \quad (17)$$

$$f_c = F_c/V\rho = 4,5\rho^{-1}a^{-2}(u - v), \quad (18)$$

а также приведенные к ускорению силы тяжести  $g$  безразмерные силы  $\tilde{f}_m = f_m/g, \quad \tilde{f}_g = f_g/g,$

$\tilde{f}_c = f_c/g$ . В результате вместо (12) получим

$$\frac{dv}{dt} = f_m + f_g + f_c; \quad \frac{d\tilde{v}}{dt} = \tilde{f}_m + \tilde{f}_g + \tilde{f}_c, \quad v = \tilde{v}g. \quad (19)$$

Для сопоставительного анализа рассмотрим поведение слабомагнитной частицы с  $\kappa=0,3$  в поле одиночного кругового цилиндра с  $\mu_R = 100$ . Примем следующие числовые параметры:  $\eta=1,2 \cdot 10^{-3}$  Па·с;  $\rho=4,5 \cdot 10^3$  кг/м<sup>3</sup>;  $\rho_c=1,05 \cdot 10^3$  кг/м<sup>3</sup> (вода);  $k_c=\rho_c/\rho=0,233$ ;  $\chi=0,3/4,5 \cdot 10^3=6,67 \cdot 10^{-5}$  м<sup>3</sup>/кг;  $g=9,81$  Н/кг. Примем также базовую величину  $f_2=0,475 \cdot 10^{13}$  А<sup>2</sup>/м<sup>3</sup> (это соответствует точке, удаленной на расстояние  $2R$  от оси цилиндра радиуса  $R=10$  мм, который находится во внешнем однород-

ном поле  $B_0=0,5$  Тл). В соответствии с (8) максимальное значение этой силы на поверхности цилиндра  $f_{2max} \approx 6,23 \cdot 10^{13}$  А<sup>2</sup>/м<sup>3</sup>. Для этих значений параметров приведенные удельные силы  $\tilde{f}$  равны:  $\tilde{f}_m = 40,58$ ;  $\tilde{f}_g = 0,767$ ;  $\tilde{f}_c = 1,2 \cdot 10^{-6} a^{-2} (\tilde{u} - \tilde{v})$ . В таблице приведены значения указанных сил для различных радиусов цилиндра и частицы (во всех вариантах принято  $r=2R$ ).

Таблица – Приведенные к  $g$  удельные силы, действующие на сферическую частицу радиуса  $a$

$R, \text{мм} \backslash a, \text{мм}$	10	1	$10^{-1}$	$10^{-2}$	$10^{-3}$	$10^{-4}$	$10^{-5}$
100	4,058 0,767 $0,012 (\tilde{u} - \tilde{v})$	4,058 0,767 $1,2 (\tilde{u} - \tilde{v})$	4,058 0,767 $120 (\tilde{u} - \tilde{v})$	4,058 0,767 $12 \cdot 10^3 (\tilde{u} - \tilde{v})$	4,058 0,767 $12 \cdot 10^5 (\tilde{u} - \tilde{v})$	4,058 0,767 $12 \cdot 10^7 (\tilde{u} - \tilde{v})$	4,058 0,767 $12 \cdot 10^9 (\tilde{u} - \tilde{v})$
10	–	40,58 0,767 $1,2 (\tilde{u} - \tilde{v})$	40,58 0,767 $120 (\tilde{u} - \tilde{v})$	40,58 0,767 $12 \cdot 10^3 (\tilde{u} - \tilde{v})$	40,58 0,767 $12 \cdot 10^5 (\tilde{u} - \tilde{v})$	40,58 0,767 $12 \cdot 10^7 (\tilde{u} - \tilde{v})$	40,58 0,767 $12 \cdot 10^9 (\tilde{u} - \tilde{v})$
1	–	–	405,8 0,767 $120 (\tilde{u} - \tilde{v})$	405,8 0,767 $12 \cdot 10^3 (\tilde{u} - \tilde{v})$	405,8 0,767 $12 \cdot 10^5 (\tilde{u} - \tilde{v})$	405,8 0,767 $12 \cdot 10^7 (\tilde{u} - \tilde{v})$	405,8 0,767 $12 \cdot 10^9 (\tilde{u} - \tilde{v})$
$10^{-1}$	–	–	–	4058 0,767 $12 \cdot 10^3 (\tilde{u} - \tilde{v})$	4058 0,767 $12 \cdot 10^5 (\tilde{u} - \tilde{v})$	4058 0,767 $12 \cdot 10^7 (\tilde{u} - \tilde{v})$	4058 0,767 $12 \cdot 10^9 (\tilde{u} - \tilde{v})$

Как видно из таблицы, во всех рассматриваемых случаях можно пренебречь гравитационной силой. Наоборот, велико влияние скорости движения среды  $u$ . В частности, при  $u=0$  извлечение частиц с указанных точек  $R=2r$  возможно во всех вариантах. Траектория движения частицы требует задания функции  $u(r, \alpha)$  и решения уравнения (19). Примеры такого анализа приведены в [7, 8]. Из выражений (19) и таблицы видно, что при  $u=0$  установившаяся скорость движения частицы равна  $v_{уст} = 0,833 \cdot 10^6 a^2 g (\tilde{f}_m - \tilde{f}_g)$  м/с. Например, для частицы радиуса  $a=10^{-4}$  мм, движущейся в изодинамическом силовом поле заданного значения,  $v_{уст}=3,25 \cdot 10^{-6}$  м/с. При этом постоянная времени движения  $\tau=0,833 \cdot 10^6 a^2$  с, что для рассматриваемого случая равно  $0,833 \cdot 10^{-8}$  с.

Таким образом, данные таблицы свидетельствуют о том, что при уменьшении размеров извлекаемых частиц внешнее поле может быть ослаблено за счет применения мелкомасштабных элементов фильтров. Однако при этом ужесточаются ограничения на скорость движения потока  $u$ , а скорость движения частиц  $v$  может упасть до уровня нм/с.

Существенное влияние на распределение силы магнитного поля оказывает форма элементов фильтра. Разнообразие фильтр-матриц известных типов полиградиентных сепараторов отражает попытки эмпирического поиска наиболее благоприятных форм элементов фильтров. Очевидно, матрица из параллельных круговых цилиндров (рис. 6,а) не является в этом отношении оптимальной. В работах

[5, 6] решена задача расчета магнитостатического поля для двоякопериодической системы стержней произвольной геометрии и концентрации, находящихся во внешнем однородном магнитном поле. Там же изложен метод определения приведенных (эффективных) параметров фильтр-матриц с двоякопериодической структурой элементов и с произвольными геометрическими параметрами элементов и их концентрацией. Эти данные нужны для расчета макроскопического намагничивающего поля в магнитной системе сепаратора [11].

На рис. 6,б для иллюстрации приведен пример стержней, формирующих геометрию типа «зуб-впадина», и которые, как показали многочисленные исследования для одиночных элементов, позволяют существенно повысить абсолютные значения магнитных сил поля [4].

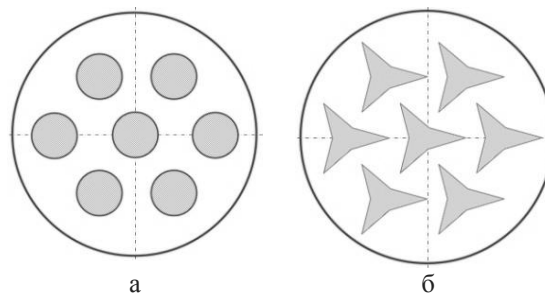


Рисунок 6 – Сепарационный канал с ферромагнитными стержнями в виде: а) – круговых цилиндров; б) – стержней сложной геометрии типа «зуб-впадина»

*Некоторые вопросы повышения точности анализа.* Рассматривая выражения (3) и (4) как основные расчетные соотношения для расчета магнитных сил, следует проанализировать границы их применимости. Напомним, что в основном соотношении (2) векторы  $J$  и  $H$  относятся к внутренним параметрам поля частицы. Поэтому применение формулы (2) корректно только в том случае, когда магнитные свойства частицы и окружающей среды одинаковы. В противном случае намагниченная частица вносит возмущение во внешнее поле, что сказывается на значении магнитной силы. Например, при внесении в квазиоднородное внешнее поле сферической частицы с магнитной восприимчивостью  $\kappa=1$  внутреннее поле  $H$  частицы ослабляется в 1,78 раз [10]. Поэтому применение формулы (8) без учета этого фактора приводит к завышенному значению силы примерно в 3,16 раз (в предположении, что градиент поля также изменяется пропорционально  $H$ ). Для  $\kappa=5$  поправочные коэффициенты еще значительнее и соответственно равны 2,67 и 7,11. Поскольку оценка деформации градиента поля достаточно сложна, иногда магнитную силу, действующую на частицу, удобнее находить через тензор натяжения по внешней границе частицы с учетом её возмущающего влияния на силовое поле сепаратора [9].

При движении частиц в потоке они проходят магнитные поля различной интенсивности. При этом магнитные свойства частиц, как правило, изменяются. Например, суперпарамагнитные частицы на основе оксида железа в диапазоне  $0 \leq H \leq 60 \div 100$  кА/м характеризуются примерно постоянной магнитной восприимчивостью, а в более сильном поле находятся в насыщенном состоянии [12]. Поэтому к одной и той же частице в зависимости от интенсивности намагничивающего поля следует применять различные модели силового поля (3), (4). Следует также учитывать значительный разброс магнитных параметров частиц в зависимости от их размеров и других факторов.

Приведенный выше анализ воздействия неоднородного магнитного поля на изолированную частицу сферической формы дает лишь общее представление о процессе полиградиентной магнитной сепарации. В реальных условиях действует множество осложняющих факторов, которые могут проявляться в различных сочетаниях, и их учет требует соответствующего обоснования. Среди таких факторов следует отметить неоднородность магнитных и гранулометрических параметров сепарируемой смеси, сложный механизм взаимодействия намагниченных частиц, их структурирование, воздействия капиллярных, диффузионных, адгезионных и других сил, определяющих поведение суспензии в неоднородном магнитном поле. Резко возросший в последнее десятилетие интерес к полиградиентной магнитной сепарации, вызванный развитием нанотехнологий, требует разработки новых математических моделей и методов, ориентированных на более полный учет факторов, влияющих на эффективность сепарации.

**ВЫВОДЫ.** Среди технически доступных на сегодня технологий полиградиентная магнитная сепарация

обеспечивает наибольшие возможности в селективном отделении слабомагнитных компонентов тонкоизмельченных смесей. Создание новых конструкций полиградиентных магнитных сепараторов потребует проведения углубленных теоретических и экспериментальных исследований, обеспечивающих дальнейший прогресс в этой области.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Кармазин В.В., Кармазин В.И. Магнитные и электрические методы обогащения полезных ископаемых. – М.: Недра. 2005. – 659 с.
2. Толмачев С.Т. Расчет силовых полей фильтрсепараторов // Обогащение руд. – 1980. – № 1. – С. 19–22.
3. Инновации в технологии магнитной обработки материалов: технология на распутье. – Режим доступа: [www.prodecolog.com.ua/jan.doc](http://www.prodecolog.com.ua/jan.doc).
4. Деркач В.Г. Специальные методы обогащения полезных ископаемых. – М.: Недра. 1966. – 340 с.
5. Толмачев С.Т., Ильченко А.В., Рожненко Ж.Г., Бондаревский С.Л. Математическое моделирование магнитного поля с двоякопериодической структурой // Праці Луганського відділення Міжнародної Академії інформатизації. – Луганськ. – 2007. – № 1 (14). – С. 141–146.
6. Толмачев С.Т., Бондаревский С.Л. Математическое моделирование высокоинтенсивного силового поля магнитных сепараторов // Вісник Криворізького технічного університету. Збірник наукових праць. – 2011. – Вип. 29. – С. 228–233.
7. Кириленко А.В., Чехун В.Ф., Подольцев А.Д. и др. Анализ силового воздействия высокоградиентного магнитного поля на магнитные наночастицы в потоке жидкости // Доповіді національної академії наук України. – 2010. – Вип. 9. – С. 162–172.
8. Кондратенко И.П., Некрасов А.В., Волканин Е.Е. Исследование магнитогидродинамического сепаратора // Науково-виробничий журнал «Електромеханічні і енергозберігаючі системи». – Кременчук, 2011. – Вип. 3/2011 (15). – С. 107–109.
9. Тамм И.Е. Основы теории электричества. – М.: Наука, 1989. – 504 с.
10. Бессонов Л.А. Теоретические основы электротехники. – М.: Высшая школа, 1973. – 752 с.
11. Толмачев С.Т., Рожненко Ж.Г. Комплексное решение задачи магнитостатики в системе с упорядоченной гетерогенной средой // Вестник Национального технического университета «ХПИ». – 2008. – № 40. – С. 139–145.
12. Лютоев А.А., Смирнов Ю.Г. Моделирование магнитных свойств суперпарамагнитных частиц оксидов железа // Сборник научных трудов VIII Международного семинара «Физико-математическое моделирование систем». – Воронеж, 2011. – Вып. 8. – С. 110–114.

## SOME PROBLEMS OF POLYGRADIENT MAGNETIC SEPARATION

S. Tolmachev, S. Bondarevskiy

Kryvoy Rog National University

ul. XXII Partsiyza, 11, Kryvoy Rog, 50027, Ukraine. E-mail: kafem@mail.ru

The problems of analyzing the force fields of magnetic separators are considered. The main factors determining the formation of the structure of the force field filter-matrix polygradient separators are analysis. The analyze of influence of the characteristic dimensions of the filter elements and the separated particles at the extracting ability of the separator is done. Some issues of improving the calculation accuracy of force characteristics of the field are also discussed.

**Key words:** polygradient separation, force field, matrix.

## REFERECES

1. Karmazin V.V., Karmazin V.I. *Magnetic and electrical methods of mineral enrichment*. – M., 2005. – 659 p. [in Russian]
2. Tolmachev S.T. Calculation of the force fields of the filter separator // *Ore enrichment*. – 1980. – № 1. – PP. 19–22. [in Russian]
3. Innovations in the technology of magnetic processing of materials: the uncertainty of technology. – Mode of access: [www.prodecolog.com.ua/jan.doc](http://www.prodecolog.com.ua/jan.doc)
4. Derkach V. *Special methods of mineral processing*. – M.: Nedra, 1966. – 340 p. [in Russian]
5. Tolmachev S.T., Ilchenko A.V., Rozhnenko J.G., Bondarevskiy S.L. Mathematical modeling of the magnetic field with a doubly periodic structure // *Proceedings of Luhansk department of the International Academy of Informatization*. – Lugansk, 2007. – № 1 (14). – PP. 141–146. [in Russian]
6. Tolmachev S.T., Bondarevskiy S.L. Mathematical modeling of high-power field of magnetic separators // *Collected Works «Journal of the Krivoy Rog Technical University»*. – Krivoy Rog, 2011. – Iss. 29. – PP. 228–233. [in Russian]
7. Kirilenko A.V., Chekhun V.F., Podoltsev A.D. and oth. Analysis of the impact of high-gradient magnetic force field on the magnetic nanoparticles in a liquid flow // *Reports of the National Academy of Sciences of Ukraine*. – K., 2010. – Iss. 9. – PP. 162–172. [in Russian]
8. Kondratenko I.P., Nekrasov A.V., Volkanin E.E. Study of magnetohydrodynamic separator // *Research and Production Magazine "Electromechanical and energy-saving system"*. – Kremenchug, 2011. – Iss. 3/2011 (15). – PP. 107–109. [in Russian]
9. Tamm I.E. *Basic theory of electricity*. – M.: Nauka, 1989. – 504 p. [in Russian]
10. Bessonov L.A. *Theoretical Foundations of Electrical Engineering*. – M.: Visshaya Shkola, 1973. – 752 p. [in Russian]
11. Tolmachev S.T., Rozhnenko J.G. Complex solution of the magnetostatic problem in a system with an ordered heterogeneous environment // *Journal of the National Technical University "HPI"*. – 2008. – № 40. – PP. 139–145. [in Russian]
12. Lyutoev A.A., Smirnov Y.G. Modelling of the magnetic properties of superparamagnetic particles of iron oxides // *Proceedings of the «VIII International Seminar «Physical-mathematical modeling of systems»*. – Voronezh, 2011. – Iss. 8. – PP. 110–114. [in Russian]

Стаття надійшла 25.02.2012.

Рекомендовано до друку  
д.т.н., проф. Загірняком М.В.