

М.В.Загирняк, член-корреспондент НАПН Украины, **Е.Е.Волканин**
Кременчугский национальный университет имени Михаила Остроградского,
ул. Первомайская, 20, Кременчуг, 39600, Украина. e-mail: volkaninz@yandex.ru

Представлено уравнение баланса сил, которые действуют на наночастицу в рабочем зазоре высокоградиентного магнитного сепаратора при осевом расположении стержней матрицы. В уравнение входит магнитная сила, сила потока жидкости и сила теплового движения. Решение полученного уравнения найдено графическим методом. Показано, что силой теплового движения можно пренебречь. Разработанный метод позволяет определить геометрические параметры ферромагнитного стержня матрицы для извлечения определённого диапазона фракций наночастиц. Сепарацию предполагается проводить поэтапно – на каждом этапе из раствора выделяется наиболее крупная фракция наночастиц. Библ. 10, рис. 4, табл. 1.

Ключевые слова: высокоградиентная магнитная сепарация, магнитные наночастицы, матрица из ферромагнитных стержней.

Введение. Применение в медицине нанопрепаратов на основе магнитных наночастиц сводится к следующим основным направлениям: адресная доставка лекарственных средств, управляемая локальная гипертермия, визуализация при проведении магнитно-резонансной томографии. Нанопрепарат представляет собой коллоидную систему, в которой наночастицы распределены в биологически совместимой жидкости. Для предотвращения агрегации и присоединения фармацевтических агентов наночастицы покрывают слоем поверхностно-активного вещества. Трудность создания такого нанопрепарата состоит в получении монодисперсной фракции. На сегодняшний день распределение по размерам наночастиц осуществляется методом центрифугирования. Вследствие малой разности масс частиц разных фракций этот процесс может длиться до нескольких суток. Вместе с тем, магнитные наночастицы разного размера значительно различаются магнитными свойствами, а именно магнитным моментом. Этот факт позволяет предположить возможность разделения наночастиц по фракциям методами магнитной сепарации. Согласно рекомендациям, которые представлены в [10], частицы микронного размера и меньше могут быть разделены с помощью технологии высокоградиентной магнитной сепарации (ВГМС).

ВГМС известна как метод для захвата магнитных и парамагнитных частиц микронного размера в потоке жидкости. Захват частиц в матрице ВГМС исследовался в [8], где в качестве матрицы использовалась стальная "шерсть". Но такая конструкция захватывает все фракции наночастиц и даже немагнитные остатки поверхностно-активного вещества (ПАВ). Указанного недостатка лишена конструкция сепаратора с осевой конфигурацией матрицы, которая описана в [3].

Целью данной работы является определение геометрических параметров (диаметра и длины) ферромагнитных стержней (элементы матрицы ВГМС), которые обеспечили бы извлечение определённой фракции наночастиц.

Уравнение траектории наночастиц в потоке жидкости. Для определения факторов, которые позволят осуществить сепарацию наночастиц по фракциям, необходимо получить уравнение их траекторий.

На рис. 1 показаны две проекции наночастицы и стержня матрицы при осевой конфигурации. В поле намагниченого стержня в потоке жидкости на наночастицу действуют гидродинамическая сила (F_v), сила магнитного поля (F_m) и сила диффузии (F_d).

Составляющие магнитной силы, действующей на наночастицу в поле стержня матрицы [3],

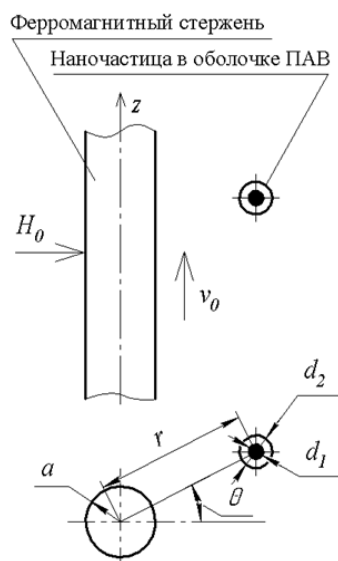


Рис. 1

$$F_{mr} = -\mu_0 M_{rod} a^2 m_p r^{-3} (M_{rod} a^2 (2H_0 r^2)^{-1} + \cos 2\theta); \quad (1)$$

$$F_{m\theta} = -\mu_0 M_{rod} a^2 m_p r^{-3} \sin 2\theta; \quad (2)$$

$$F_{mz} = 0, \quad (3)$$

где μ_0 – магнитная проницаемость вакуума, Гн/м; M_{rod} – намагниченность стержня, А/м; a – радиус стержня матрицы, м; m_p – собственный магнитный момент наночастицы, А·м²; r – расстояние между осью стержня и центром наночастицы, м; H_0 – напряженность внешнего магнитного поля, А/м.

Гидродинамическая сила в цилиндрических координатах (r, θ, z) [3]

$$F_{vr} = 3\pi\eta d_2 (v_r - dr/dt); \quad F_{v\theta} = 3\pi\eta d_2 (v_\theta - rd\theta/dt); \quad F_{vz} = 3\pi\eta d_2 (v_z - dz/dt), \quad (4,5,6)$$

где η – динамическая вязкость растворителя, Па·с; d_2 – диаметр наночастицы в липидной оболочке (гидродинамический диаметр, принимаем $d_2 = d_1 + 2\delta$, где $\delta = 2 \cdot 10^{-9}$ м – толщина слоя ПАВ), м; d_1 – диаметр магнитного ядра наночастицы, м; t – время, с; v_r, v_θ, v_z – составляющие скорости потока жидкости, м/с.

При осевой конфигурации матрицы составляющие скорости потока жидкости [10]

$$v_r = 0; \quad v_\theta = 0; \quad v_z = v_0, \quad (7)$$

где v_0 – скорость движения сепарируемого продукта в сепарационном канале, м/с.

Сила диффузии в цилиндрических координатах [3]

$$F_{dr} = -kTn^{-1} dn/dr; \quad F_{d\theta} = -kTn^{-1} r^{-1} dn/d\theta; \quad F_{dz} = 0, \quad (8,9,10)$$

где k – постоянная Больцмана, Н·м/К; T – абсолютная температура, К; n – концентрация частиц, г/л.

Запишем уравнение баланса сил в цилиндрических координатах, используя (1–6), (8–10) и

учитывая (7),

$$-\frac{\mu_0 M_{rod} a^2 m_p}{r^3} \left(\frac{M_{rod} a^2}{2H_0 r^2} + \cos 2\theta \right) + 3\pi\eta d_2 \left(-\frac{dr}{dt} \right) - \frac{kT}{n} \frac{dn}{dr} = 0; \quad (11)$$

$$-\frac{\mu_0 M_{rod} a^2 m_p}{r^3} \sin 2\theta + 3\pi\eta d_2 \left(-r \frac{d\theta}{dt} \right) - \frac{kT}{n} \frac{1}{r} \frac{dn}{d\theta} = 0; \quad 3\pi\eta d_2 (v_0 - dz/dt) = 0. \quad (12,13)$$

При напряженности внешнего магнитного поля ($H_0 \geq 0,4 \cdot 10^6$ А/м), достаточной для намагничивания наночастиц до насыщения, их магнитный момент прямо пропорционален объему магнитного ядра (V_{pl}) [2, 7]

$$m_p = M_p V_{pl}; \quad M_p = M_s, \quad (14)$$

где M_p – намагниченность наночастицы, А/м; M_s – намагниченность насыщения (наиболее распространенный материал для изготовления наночастиц – магнетит, намагниченность насыщения которого $M_s = 0,47 \cdot 10^6$ А/м). Таким образом, намагничивание наночастиц до насыщения является одним из главных условий для разделения фракций, следовательно, магнитная система сепаратора должна создавать требуемую для этого напряженность поля в рабочем зазоре.

Намагниченность стержня матрицы также зависит от напряженности внешнего магнитного поля. Для упрощения расчетов принимаем, что стержень намагничен до насыщения $M_{rod} = 2 \cdot 10^6$ А/м (намагниченность насыщения электротехнической магнитомягкой стали) в поле $H_0 = 1 \cdot 10^6$ А/м [1], $M_p = M_s = 0,47 \cdot 10^6$ А/м, $M_{rod} = 2 \cdot 10^6$ А/м.

Для удобства дальнейшего анализа процесса сепарации согласно методологии, примененной в [6], выполним замены: $r_a = r/a$; $z_a = z/a$. Тогда

$$\frac{dr_a}{dt} = -\frac{\mu_0 M_{rod} m_p}{3\pi\eta d_2 r_a^3 a^2} \left(\frac{M_{rod}}{2H_0 r_a^2} + \cos 2\theta \right) - \frac{kT}{3\pi\eta d_2 n a^2} \frac{dn}{dr_a}, \quad (15)$$

$$\frac{d\theta}{dt} = -\frac{\mu_0 M_{rod} m_p}{3\pi\eta d_2 r_a^4 a^2} \sin 2\theta - \frac{kT}{3\pi\eta d_2 n a^2} \frac{1}{r_a^2} \frac{dn}{d\theta}, \quad (16)$$

$$dz_a/dt = v_0/a. \quad (17)$$

Дифференциальные уравнения (15–17) являются уравнениями траектории наночастиц в магнитном поле намагниченного стержня матрицы ВГМС. На скорость наночастиц влияет поле намагниченного стержня матрицы, сила теплового движения и гидродинамическое сопротивление жидкости. Уравнения (15–17) не учитывают характер распределения скорости жидкости в канале сепарации, который описывается законом Пуазейля (непосредственно у стенки канала и поверхности стержневой скорость потока близка к нулю и максимальна в области, наиболее удаленной от стенок и стержней). При низких скоростях потока ($\approx 0,001$ м/с) указанным эффектом можно пренебречь, и это не повлияет на общие результаты сепарации. Если необходимо учесть характер распределения скорости, соответствующее аналитическое выражение подставляется в уравнение (17) вместо переменной v_0 .

Решение уравнения траектории наночастиц. Уравнения (15, 16) не решаются аналитичес-

ки, так как в каждом из них две производные, соответственно: dr_a/dt и dn/dr_a , $d\theta/dt$ и $dn/d\theta$. Решение может быть найдено графическим методом.

Предположим, что жидкость неподвижна ($F_v=0$), тогда $dr_a/dt=0$ и $d\theta/dt=0$. При этих условиях уравнения (15, 16) решаются аналитически. Выполним интегрирование по dn/dr_a с граничным условием $n=n_0$, когда $r_a = \infty$ [8]

$$n = n_0 \exp\left(\frac{\mu_0 M_{rod} m_p}{2kT r_a^2} \left(\frac{M_{rod}}{4H_0 r_a^2} + \cos 2\theta\right)\right), \quad (18)$$

где n_0 – начальная концентрация наночастиц в исходном растворе, г/л; n – концентрация частиц, захваченных магнитным полем стержня, г/л.

Концентрацию n можно оценить, если считать структуру захваченных частиц в виде простой кубической упаковки [5] $n = (2d_2)^{-3}$.

Численный анализ показал, что $M_{rod} (4H_0 r_a^2)^{-1} \ll \cos 2\theta$. Поэтому, пренебрегая $M_{rod}/4H_0 r_a^2$, получим

$$r_a = \sqrt{\frac{\mu_0 M_{rod} m_p \cos 2\theta}{kT \cdot 2 \ln(n/n_0)}}. \quad (19)$$

Выражение (19) является решением уравнений траектории наночастиц в плоскости, перпендикулярной оси стержня. На рис. 2: 1 – поверхность стержня матрицы; 2, 3, 4, 5, 6 – изолинии, ограничивающие области извлечения

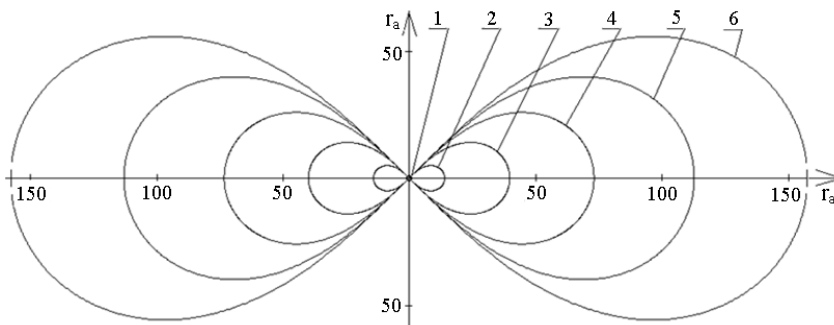


Рис. 2

извлечения), вне данной области доминирует сила теплового движения. Из рисунка видно, что наночастицы большего размера захватываются магнитным полем стержня на большем удалении от его оси, чем наночастицы меньшего размера.

Предположим далее, что тепловое движение отсутствует ($F_d=0$), а жидкость подвижна. Тогда $dn/dr_a=0$ и $dn/d\theta=0$. При таких условиях из уравнений (8, 9) получим

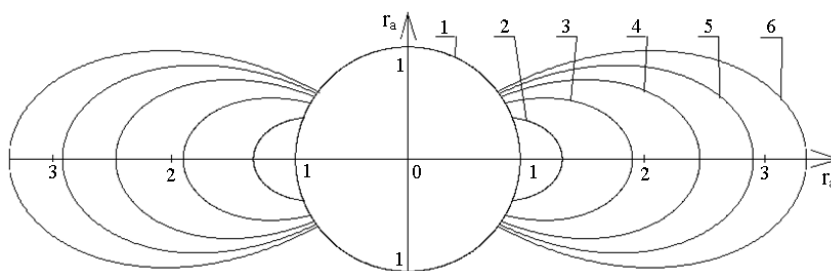


Рис. 3

На рис. 3: 1 – поверхность стержня матрицы; 2, 3, 4, 5, 6 – изолинии, ограничивающие области извлечения магнитным полем в движущейся жидкости при отсутствии теплового движения наночастиц фракций с диаметром магнитного ядра 20 нм, 40 нм, 60 нм, 80 нм, 100 нм соответственно. Изолинии представляют собой совокупность точек, в которых магнитная сила компенсирует гидродинамическую

движения магнитным полем в неподвижной жидкости наночастиц фракций с диаметром магнитного ядра 20 нм, 40 нм, 60 нм, 80 нм, 100 нм соответственно. Изолинии показывают совокупность точек, в которых магнитная сила компенсирует силу теплового движения, т.е. в этих точках частицы неподвижны. В области, ограниченной изолинией, доминирует магнитная сила (область извлечения), вне данной области доминирует сила теплового движения. Из рисунка видно, что наночастицы большего размера захватываются магнитным полем стержня на большем удалении от его оси, чем наночастицы меньшего размера.

$$\frac{dr_a}{dt} = -\frac{\mu_0 M_{rod} m_p}{3\pi\eta d_2 r_a^3 a^2} \left(\frac{M_{rod}}{2H_0 r_a^2} + \cos 2\theta\right); \quad (20)$$

$$\frac{d\theta}{dt} = -\frac{\mu_0 M_{rod} m_p}{3\pi\eta d_2 r_a^4 a^2} \sin 2\theta. \quad (21)$$

Если выполняется (11–13) при $F_d=0$, то

$$dr_a/dt = dz_a/dt. \quad (22)$$

Исходя из (17, 20, 22) запишем

$$-r_a^5 + \frac{\mu_0 M_{rod} m_p \cos(2\theta) r_a^2}{3\pi\eta d_2 v_0 a} + \frac{\mu_0 M_{rod}^2 m_p}{6H_0 \pi\eta d_2 v_0 a} = 0. \quad (23)$$

силу. В области, которая ограничена изолинией, доминирует магнитная сила (область извлечения).

Графическим решением уравнений (15, 16) являются точки плоскости, принадлежащие как области извлечения, построенной по (19), так и области, построенной по (23). Построим эти изолинии в одной системе координат (рис. 4).

На рис. 4 показано поперечное сечение 1 стержня и областей извлечения. Изолиния 3 (рис. 4)

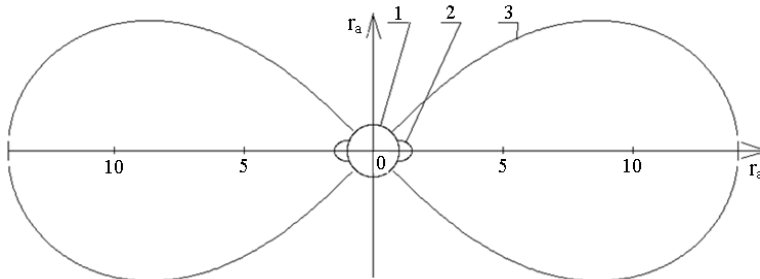


Рис. 4

охватывает область извлечения в неподвижной жидкости (она определяется тепловым движением частиц). Изолиния 2 охватывает область извлечения в движущейся жидкости при предположении, что теплового движения не существует. Как видно из рис. 4, решение уравнения совпадает с областью, ограниченной линией 2. Следовательно, в движущейся жидкости силой теплового движения можно пренебречь.

Разработка метода определения радиуса и длины стержня матрицы.

Условие извлечения частицы магнитным полем на поверхность намагниченного стержня определено в [9]

$$F_m \geq F_v. \quad (24)$$

Для упрощения задачи будем рассматривать действие магнитной силы вдоль направления r при $\theta=0; \pi$. Запишем (24) для нашего случая

$$F_{mr \max} = F_{vz}, \quad (25)$$

где $F_{mr \max}$ – сила магнитного поля на поверхности стержня в точках $\theta=0; \pi$, Н; F_{vz} – гидродинамическая сила, направленная вдоль оси z (рис. 1), Н.

На поверхности стержня $r_a=1$, поэтому перепишем (25), подставив выражения для сил, учитывая (7), $\mu_0 M_{rod} m_p a^{-1} (0,5 M_{rod} H_0^{-1} + 1) = 3\pi \eta d_2 v_0$, откуда радиус стержня матрицы, который извлечёт частицу определённой фракции,

$$a = \frac{\mu_0 M_{rod} m_p}{3\pi \eta d_2 v_0} \left(\frac{M_{rod}}{2H_0} + 1 \right). \quad (26)$$

Длина стержня матрицы зависит от начального положения частицы. Для получения аналитического выражения расчёта длины стержня воспользуемся методологией, описанной в [4]. Используя законы дифференцирования сложных функций из (17, 20, 21), получим

$$\frac{dz_a}{d\theta} = -\frac{v_0 3\pi \eta d_2 r_a^4 a}{\mu_0 M_{rod} m_p \sin 2\theta}; \quad \frac{dz_a}{dr_a} = \frac{v_0 3\pi \eta d_2 a^2 r_a^3}{\mu_0 m_p M_{rod}} \left(\frac{2H_0 r_a^2}{M_{rod}} + \cos^{-1} 2\theta \right). \quad (27,28)$$

Выражения (27, 28) позволяют найти необходимую длину стержня для извлечения частиц. Наиболее удаленная от поверхности стержня точка притяжения частицы находится на расстоянии r при $\theta=0; \pi$. Поэтому для определения длины стержня удобно воспользоваться выражением (30) для случая $\theta=0$. Проинтегрировав его, получим [6]

$$z_a = \frac{3v_0 \pi \eta d_2 a}{4\mu_0 m_p M_{rod}} \times \left(\frac{M_{rod} (r_{a1}^2 - r_{a0}^2)}{H_0} - \frac{M_{rod}^2}{2H_0^2} \ln \left(\frac{M_{rod} + 2H_0 r_{a1}^2}{M_{rod} + 2H_0 r_{a0}^2} \right) - r_{a1}^4 + r_{a0}^4 \right), \quad (29)$$

где r_{a0} – начальное положение частицы; r_{a1} – конечное положение частицы.

Так как конечное положение частицы соответствует поверхности стержня, то $r_{a1}=1$. Тогда из (29) получаем выражение для расчета длины стержня матрицы

$$l_{rod} = \frac{3v_0\pi\eta d_2 a^2}{4\mu_0 m_p M_{rod}} \times \left(\frac{M_{rod}(1-r_{a0}^2)}{H_0} - \frac{M_{rod}^2}{2H_0^2} \ln \left(\frac{M_{rod} + 2H_0}{M_{rod} + 2H_0 r_{a0}^2} \right) - 1 + r_{a0}^4 \right). \quad (30)$$

Параметр r_{a0} определяет наиболее удалённую область сепарационного канала, с которой будет извлечена магнитная частица определённой фракции. Производительность сепарационной системы зависит от принятого значения r_{a0} (увеличение r_{a0} приводит к увеличению площади поперечного сечения канала и длины стержней).

Для расчёта геометрических параметров стержней матрицы примем следующие характерные значения входящих в (26, 30) величин: $v_0=0,001$ м/с; $\eta=1,46 \cdot 10^{-3}$ Па · с (согласно [2]); $r_{a0}=3,5$ (половина среднего относительного расстояния между стержнями матрицы высокоградиентных магнитных сепараторов). Результаты расчёта геометрических параметров ферромагнитных стержней матрицы, необходимые для извлечения фракций наночастиц, представлены в таблице.

d_j , нм	m_p , А·м ²	a , мм	$l_{ст}$, мм
20	$1,9 \cdot 10^{-18}$	0,0422	3,7622
40	$1,5 \cdot 10^{-17}$	0,1816	16,2007
60	$5,3 \cdot 10^{-17}$	0,4411	39,3542
80	$1,2 \cdot 10^{-16}$	0,7610	67,8886
100	$2,4 \cdot 10^{-16}$	1,2293	109,6662

Анализ данных, рассчитанных по (26, 30) и приведенных в таблице, показал, что геометрические параметры стержня находятся в приемлемом для технической реализации диапазоне размеров.

Матрица высокоградиентного магнитного сепаратора, рассчитанная по разработанной методике, способна извлекать наночастицы заданной фракции, а также более крупные. Поэтому сепарацию исходного препарата следует проводить в несколько этапов, в каждом из которых применяются стержни разного диаметра (от наибольшего рассчитанного до наименьшего) и извлекаются наночастицы соответствующих фракций (крупная, а затем более мелкие). После удаления наиболее мелких магнитных фракций в растворителе останутся пустые липидные оболочки (избыток поверхностно-активного вещества) и наночастицы с диаметром магнитного ядра меньше 10 нм, магнитный момент которых недостаточен для захвата магнитным полем и противодействия силе сопротивления жидкости.

Заключение. 1. Получены уравнения движения наночастиц в потоке жидкости в поле намагниченного стержня матрицы высокоградиентного сепаратора. Их решение найдено графическим методом.

2. Анализ полученного решения позволяет утверждать, что в потоке жидкости силой теплового движения можно пренебречь, а траектория частицы определяется гидродинамической силой.

3. На основании уравнения баланса сил, действующих на наночастицу в высокоградиентном поле в потоке жидкости, получены аналитические выражения для расчёта технически реализуемых геометрических параметров ферромагнитного стержня матрицы, обеспечивающих извлечение наночастиц заданной фракции.

1. *Казаджан Л.Б.* Магнитные свойства электротехнических сталей и сплавов. – М.: Наука и технологии, 2000. – 224 с.

2. *Кириленко А.В., Чехун В.Ф., Подольцев А.Д., Кондратенко И.П., Кучерявая И.Н., Бондар В.В., Шпилевая С.И., Тодор И.Н.* Анализ силового воздействия высокоградиентного магнитного поля на магнитные наночастицы в потоке жидкости // Доповіді Національної академії наук України. – 2010. – № 9. – С. 162–172.

3. *Кондратенко И.П., Некрасов А.В., Волканин Е.Е.* Электротехническая система с составными стержнями для высокоградиентной магнитной сепарации // Электротехніка і електромеханіка. – 2012. – № 2. – С. 38–41.

4. *Badescu V., Murariu V., Rotariu O., Rezlescu N.* A study of the conditions of maximum filtration efficiency for a HGMF-axial magnetic filter cell with bounded flow field // Magnetic and Electrical Separation. – 1996. – № 8. – Pp. 23–40.

5. *Fletcher D.* Fine Particle High Gradient Magnetic Entrapment // IEEE Trans. Magn. – 1991. – №27. – Pp. 36–55.

6. *Gerber R., R.R. Birss.* High Gradient Magnetic Separation. – London: Research Studies Press, 1983.

7. *Hua Xu, Tao Song, Xiuqi Bao, Lili Hu.* Site-directed research of magnetic nanoparticles in magnetic drug targeting // Journal of Magnetism and Magnetic Materials. – 2005. – № 193. – Pp. 514–519.

8. *Moeser G.D., Kaitlin A. Roach, William H. Green, Alan T. Hatton.* High-Gradient Magnetic Separation of Coated Magnetic Nanoparticles // American Institute of Chemical Engineers. – 2004. – № 50. – Pp. 2835–2848.

9. *Ovidiu Rotariu, Iain D. Ogden, Marion MacRae, Laura Elena Udrea, Norva, J.C. Strachan.* Multiple sample flow through immunomagnetic separator for concentrating pathogenic bacteria // Physics in Medicine and Biology. – 2005. – № 50. – Pp. 2967–2977.

10. *Svoboda J.* Magnetic Techniques for the Treatment of Materials // Kluwer Academic Publishers, USA. – 2004. – 404 p.

РОЗРОБКА МЕТОДУ ВИЗНАЧЕННЯ ГЕОМЕТРИЧНИХ ПАРАМЕТРІВ ЕЛЕМЕНТУ МАТРИЦІ ВИСОКОГРАДІЄНТНОГО СЕПАРАТОРА НАНОЧАСТОК

М.В.Загірняк, член-кореспондент НАПН України, **Є.Є.Волканін**
Кременчуцький національний університет імені Михайла Остроградського,
вул. Першотравнева, 20, Кременчук, 39600, Україна.
e-mail: volkaninz@yandex.ru

Представлено рівняння балансу сил, що діють на наночастку в робочому проміжку високоградієнтного магнітного сепаратора при осьовому розташуванні стрижнів матриці. У рівняння входять магнітна сила, сила потоку рідини і сила теплового руху. Рішення отриманого рівняння знайдено графічним методом. Показано, що силою теплового руху можна знехтувати. Розроблений метод дозволяє визначити геометричні параметри феромагнітного стрижня матриці для вилучення певного діапазону фракцій наночастинок. Сепарацію передбачається проводити поетапно – на кожному етапі з розчину виділяється найкрупніша фракція наночастинок. Бібл. 10, табл. 1, рис. 4.

Ключові слова: високоградієнтна магнітна сепарація, магнітні наночастки, матриця із феромагнітних стрижнів.

DEVELOPMENT OF A METHOD DEFINITION OF GEOMETRICAL PARAMETERS OF THE ELEMENT MATRIX HIGH-GRADIENT SEPARATOR NANOPARTICLES

M.V.Zagirnyak, Ye.Ye.Volkanin
Kremenchuk Mykhailo Ostrohradskiy National University
str. Pershotravneva, 20, Kremenchuk, 39600, Ukraine.
e-mail: volkaninz@yandex.ru

The equation of balance of forces acting on a nanoparticle in the working gap of a high gradient magnetic separator with axial location of the matrix rods is presented. The equation includes the magnetic force, the force of the fluid flow and the force of the thermal motion. The solution of the equation is found by graphical methods. It is shown that the force of the thermal motion can be neglected. The developed method allows to determine the geometric parameters of the matrix ferromagnetic rod in order to extract a certain range of nanoparticles fractions. The separation is expected to be carried out in stages – at every stage the largest fraction of nanoparticles is extracted from the solution. References 10, table 1, figures 4.

Key words: high gradient magnetic separation, magnetic nanoparticles, matrix of ferromagnetic rods.

1. Kazadzhan L.B. The magnetic properties of electrical steels and alloys. – Moskva: Nauka i tekhnologii, 2000. – 224 p. (Rus)
2. Kirilenko, A.V., Chekhun V.F., Podoltsev A.D., Kondratenko I.P., Kucheriavaia I.N., Bondar V.V., Shpilevaia S.I., Todor I.N., Analysis of the force action of a high-gradient magnetic field on magnetic nanoparticles in a flowing fluid // *Dopovidi Natsionalnoi Akademii nauk Ukrainy.* – 2010. – № 9. – Pp. 162–172. (Rus)
3. Kondratenko I.P., Nekrasov A.V., Volkanin Ye.Ye. Electrical engineering system with component bars for a high-gradient magnetic separation // *Elektrotehnika i elektromekhanika.* – 2012. – № 2. – Pp. 38–41. (Rus)
4. Badescu V., Murariu V., Rotariu O., Rezlescu N. A study of the conditions of maximum filtration efficiency for a HGMF-axial magnetic filter cell with bounded flow field // *Magnetic and Electrical Separation.* – 1996. – № 8. – Pp. 23–40.
5. Fletcher D. Fine Particle High Gradient Magnetic Entrapment // *IEEE Trans. Magn.* – 1991. – №27. – Pp. 36–55.
6. Gerber R., R.R. Birss. High Gradient Magnetic Separation. – London: Research Studies Press, 1983.
7. Hua Xu, Tao Song, Xiuqi Bao, Lili Hu. Site-directed research of magnetic nanoparticles in magnetic drug targeting // *Journal of Magnetism and Magnetic Materials.* – 2005. – № 193. – Pp. 514–519.
8. Moeser G.D., Kaitlin A. Roach, William H. Green, Alan T. Hatton. High-Gradient Magnetic Separation of Coated Magnetic Nanoparticles // *American Institute of Chemical Engineers.* – 2004. – № 50. – Pp. 2835–2848.
9. Ovidiu Rotariu, Iain D. Ogden, Marion MacRae, Laura Elena Udrea, Norval J.C. Strachan. Multiple sample flow through immunomagnetic separator for concentrating pathogenic bacteria // *Physics in Medicine and Biology.* – 2005. – № 50. – Pp. 2967–2977.
10. Svoboda J. Magnetic Techniques for the Treatment of Materials // *Kluwer Academic Publishers, USA.* – 2004. – 404 p.

Надійшла 24.10.2013
Остаточний варіант 16.01.2014