

ЭЛЕКТРОТЕХНИЧЕСКАЯ СИСТЕМА С СОСТАВНЫМИ СТЕРЖНЯМИ ДЛЯ ВЫСОКОГРАДИЕНТНОЙ МАГНИТНОЙ СЕПАРАЦИИ

Розглянуто основні конфігурації матриці високоградієнтного сепаратора. Описано сили, що діють на наночастинку в сепаратійному каналі. Проведено моделювання елемента матриці в робочому проміжку. Запропонована нова конструкція матриці з складеними стрижнями для сепарації наночастинок в ліпідних оболонках.

Рассмотрены основные конфигурации матрицы высокоградиентного сепаратора. Описаны силы, действующие на наночастицу в сепарационном канале. Проведено моделирование элемента матрицы в рабочем зазоре. Предложена новая конструкция матрицы с составными стержнями для сепарации наночастиц в липидных оболочках.

ВВЕДЕНИЕ

В Украине, как и во многих других странах, в рамках государственной научно-технической программы НАН "Наноструктурные системы, наноматериалы и нанотехнологии" ведутся исследования по проблемам нанотехнологий [1]. Разрабатывается новый метод создания нанокомпозита, который применяется в клинической онкологии при управляемой локальной гипертермии и направленной доставке лекарств.

Нанокомпозит представляет собой противоопухолевый препарат в липосомной фракции содержащий ферромагнетик (магнетит). Один из этапов производства композита предусматривает нанесение липидного слоя поверхностно-активных веществ (ПАВ) на наноразмерный магнетит в ультразвуковом поле. В результате образуется две фракции – наночастицы ферромагнетика в липидной оболочке и не магнитные частицы липида (ПАВ). Первая фракция и является нанокомпозитом, а вторую необходимо удалить из раствора. Так как фракции значительно различаются по магнитным свойствам целесообразно применить высокоградиентную магнитную сепарацию (ВГМС) для удаления избытка ПАВ.

АНАЛИЗ ПРЕДЫДУЩИХ ИССЛЕДОВАНИЙ

За последние несколько десятилетий техника высокоградиентной магнитной сепарации получила широкое распространение. Данный процесс применяется при обогащении каолина и обработке сточных вод [2]. Позже ВГМС использовалась для выборочного удаления клеток [3], экологических (радионуклиды) [4] и неполярных органических загрязнителей [5]. Высокоградиентная магнитная сепарация успешно применялась при разделении протеинов с помощью наночастиц покрытых фосфолипидом [6].

Принцип действия ВГМС сводится к захвату мелких частиц (магнитных и парамагнитных) ферромагнитной матрицей расположенной в сильном магнитном поле. Матрица концентрирует вторичное поле, что позволяет достичь высоких градиентов магнитной индукции в сепарационном канале. Технологический процесс ВГМС состоит из этапа извлечения (рис. 1,а) и этапа отмывки (рис. 1,б).

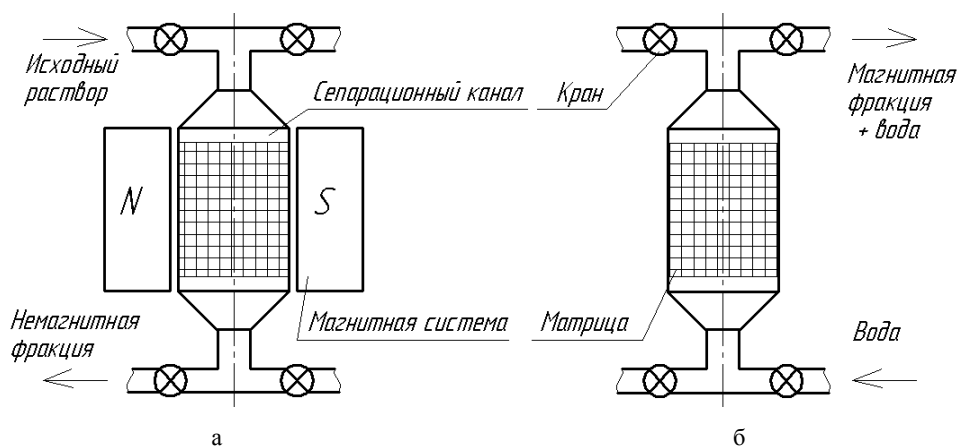


Рис. 1. Этапы высокоградиентной магнитной сепарации

Матрица представляет собой ферромагнитные провода или стержни определенным образом ориентированные в рабочем объеме. Все возможные конфигурации взаимного расположения элемента матрицы, потока исходного раствора (v_0) и направления магнитного поля (H_0) сводятся к трём основным вариантам (рис. 2).

При ориентации элемента матрицы перпендикулярно потоку (рис. 2,а,б) и высокой концентрации

магнитных частиц существует высокая вероятность механического захвата немагнитной частицы в слой магнитных. Следовательно, при сепарации наночастиц в липидных оболочках применение данной схемы может привести к недостаточно качественной очистке раствора от избытка ПАВ.

Вероятность механического захвата немагнитной частицы значительно снижается, если поток направлен параллельно элементу матрицы (рис. 2,в). В этом

случае, при высокой концентрации магнитных частиц, может произойти закупорка канала магнитными частицами, осевшими на поверхность элементов матрицы. При увеличении расстояния между стержнями матрицы вышеописанная ситуация будет исключена, но часть магнитных частиц не попадут в зону действия высокоградиентного поля и будут смыты вместе с немагнитной фракцией.

Анализ предыдущих исследований показал, что вопрос магнитной сепарации наночастиц в липидных оболочках остаётся открытым и требует дальнейших исследований.

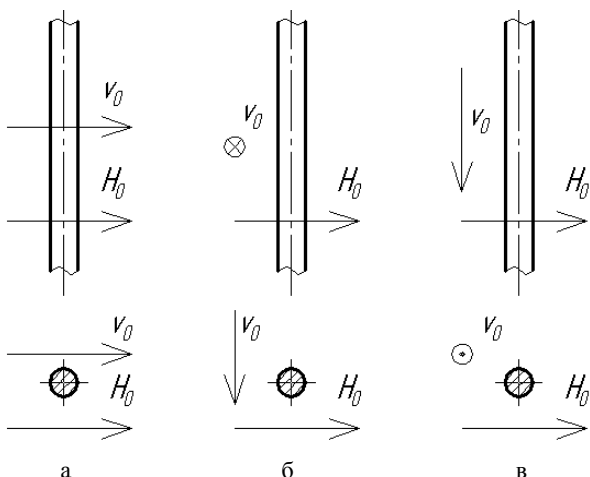


Рис. 2. Возможные геометрические конфигурации взаимного расположения элемента матрицы, направления магнитного поля и потока исходного раствора

ЦЕЛЬ РАБОТЫ

Описание сил, действующих на наночастицу в липидной оболочке при осевой конфигурации матрицы. Определение области захвата частиц с помощью моделирования в программном пакете COMSOL Multiphysics. Обоснование конструкции высокоградиентной матрицы и канала сепарации на основании результатов моделирования.

МАТЕРИАЛ И РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Проблема исследования механизма захвата частиц в матрице высокоградиентного сепаратора может быть значительно упрощена, если рассматривать взаимодействие одной наночастицы с одним стержнем матрицы (рис. 3).

Известно уравнение баланса сил, определяющее движение магнитной наночастицы в потоке жидкости вблизи намагниченного стержня матрицы:

$$F = F_m + F_d + F_g + F_i + F_v, \quad (1)$$

где F_m – магнитная сила; F_d – сила диффузии; F_g – гравитационная сила; F_i – сила инерции; F_v – гидродинамическая сила.

Для наночастицы в липидной оболочке выполняется условие (2), следовательно, гравитационными и инерционными силами (F_g , F_i) можно пренебречь [7].

$$\frac{2\rho b_1^2}{9\eta} \ll 1, \quad (2)$$

где ρ и b_1 – плотность и радиус наночастицы в липидной оболочке; η – динамическая вязкость жидкости.

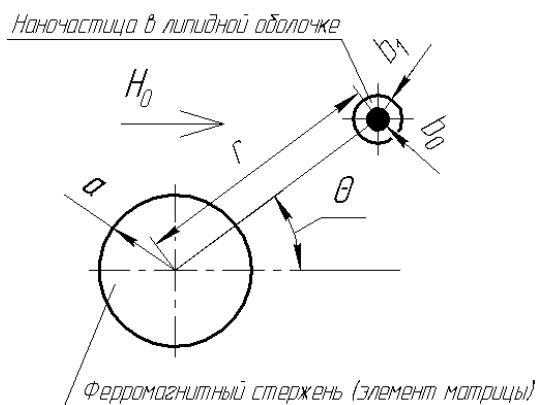


Рис. 3. Локация магнитного липида относительно стержня матрицы

Диффузия частицы может быть описана как движущая сила, которая является результатом градиента концентрации частиц [8]. В полярных координатах составляющие диффузионной силы могут быть записаны следующим образом:

$$F_{dr} = -\frac{kT}{n} \frac{dn}{dr}; \quad (3)$$

$$F_{d\theta} = -\frac{kT}{n} \frac{1}{r} \frac{dn}{d\theta}, \quad (4)$$

где T – абсолютная температура; n – концентрация.

Гидродинамическая сила получена из уравнения Стокса и составляющие этой силы:

$$F_{vr} = 6\pi\eta b_1 \left(v_r - \frac{dr}{dt} \right); \quad (5)$$

$$F_{v\theta} = 6\pi\eta b_1 \left(v_\theta - r \frac{d\theta}{dt} \right), \quad (6)$$

где v_r и v_θ – компоненты скорости потока жидкости.

В общем виде сила, воздействующая на частицу в магнитном поле, прямо пропорциональна градиенту напряженности ($\text{grad}H$) и намагниченности наночастицы ($M_{\text{чacm}}$):

$$F_m = \mu_0 V M_{\text{чacm}} \text{grad}H, \quad (7)$$

где μ_0 – магнитная проницаемость вакуума; V – объем наночастицы.

Напряженность поля вокруг намагниченного провода в полярных координатах [2]:

$$H_r = \left(\frac{M_{cm} a^2}{2r^2} + H_0 \right) \cos \theta; \quad (8)$$

$$H_\theta = \left(\frac{M_{cm} a^2}{2r^2} - H_0 \right) \sin \theta, \quad (9)$$

где H_0 – напряженность внешнего магнитного поля; M_{cm} – намагниченность стержня (элемента матрицы).

Основываясь на (7-9) запишем составляющие силы магнитного поля [6]:

$$F_{mr} = -\frac{4\pi\mu_0 M_{cm} M_{\text{чacm}} a^2 b_0^3}{3r^3} \left(\frac{M_{cm} a^2}{2H_0 r^2} + \cos 2\theta \right); \quad (10)$$

$$F_{m\theta} = -\frac{4\pi\mu_0 M_{cm} M_{\text{чacm}} a^2 b_0^3}{3r^3} \sin 2\theta, \quad (11)$$

где b_0 – радиус наночастицы без липидной оболочки.

Радиальный компонент магнитной силы (F_{mr}) между частицей и стержнем положителен при условии [7]:

$$\frac{M_{cm}a^2}{r^2} + H_0 \cos 2\theta > 0. \quad (12)$$

Составляющая F_{mr} становится отталкивающей в двух симметричных областях, границы которых определяются критическим углом (рис. 4):

$$\theta_{кр} = \arctan \left(\frac{1 + \frac{M_{cm}a^2}{2H_0r^2}}{1 - \frac{M_{cm}a^2}{2H_0r^2}} \right). \quad (13)$$

Таким образом, зная составляющие (1), можно рассчитать баланс сил, действующих на магнитную частицу, и её траекторию в сепарационном канале.

С помощью пакета COMSOL Multiphysics была создана плоскопараллельную модель. Стальной стержень ($a = 0,5\text{ мм}$, $\mu = 200$) помещён в однородное магнитное поле ($H_0 = 5,3 \cdot 10^5 \text{ А/м}$). Визуализация напряженности поля (рис. 4) показывает симметричные области притяжения и отталкивания, что подтверждается теоретическими выкладками (12, 13). Определена область гарантированного захвата магнитных частиц с учётом гидродинамической силы и диффузии (рис. 5) при скорости потока $0,002 \text{ м/с}$ и следующих характеристиках магнитных липидов [9]: $M_{част} = 3,2 \cdot 10^5 \text{ А/м}$ ($H_0 = 4 \cdot 10^5 \text{ А/м}$); $b_1 = 7 \text{ нм}$; $b_0 = 5 \text{ нм}$; $\eta = 120 \text{ мПа}\cdot\text{с}$.

Зная область действия одного элемента матрицы можно предложить такую её конструкцию, при которой весь поток будет перекрыт высокоградиентным полем. А чтобы исключить возможность перекрытия проходного сечения захваченными магнитными частицами, стержни следует выполнить составными – состоящими из ферромагнитной и немагнитной частей (рис. 6). Моделирование поля матрицы с составными стержнями представлено на рис. 7.

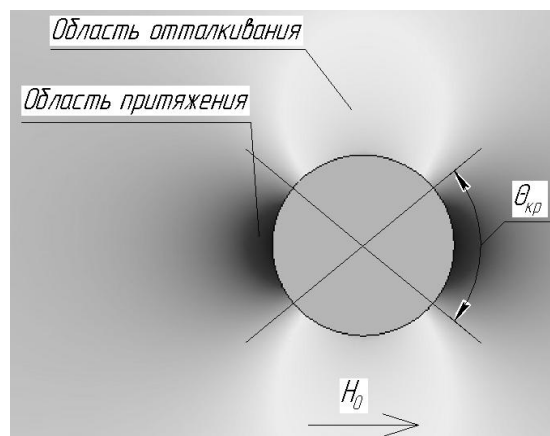


Рис. 4. Визуализация напряженности магнитного поля ферромагнитного стержня

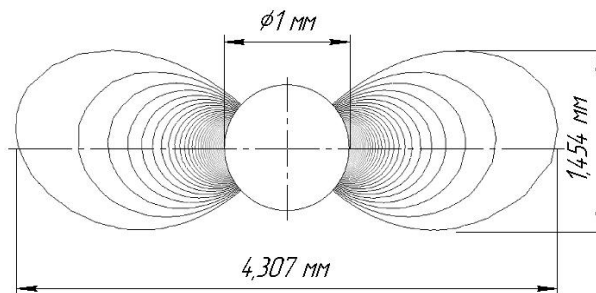


Рис. 5. Область действия притягивающей магнитной силы

Таким образом, исходный раствор, проходя через матрицу сепаратора, будет попадать в высокоградиентные поля, находящиеся в разных зонах канала, что обеспечит высокую эффективность разделения и гарантированное извлечение магнитных липидов из раствора.

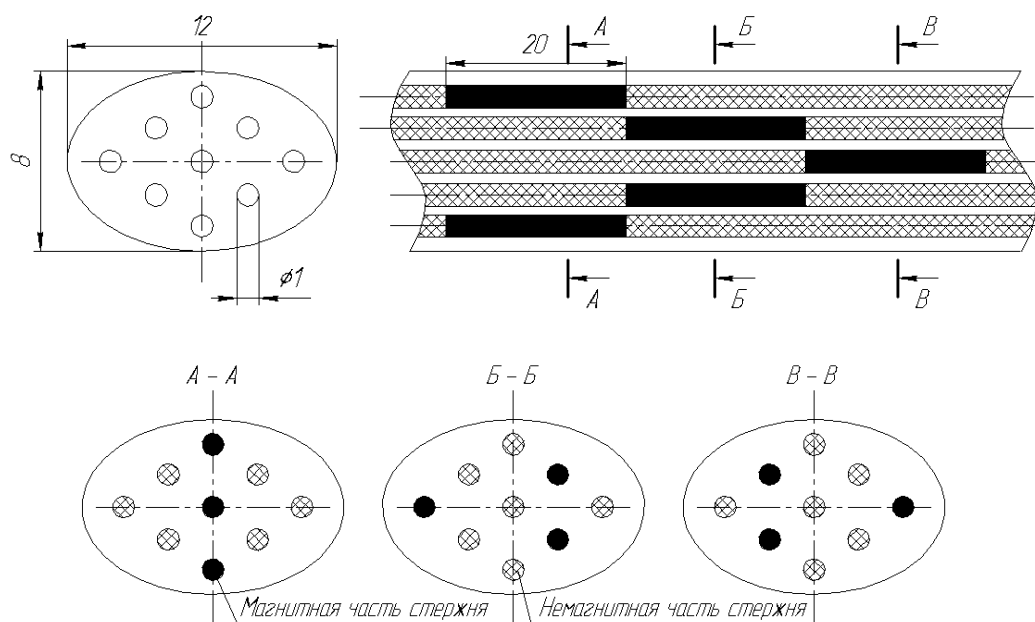


Рис. 6. Конструкция сепарационного канала с составными стержнями

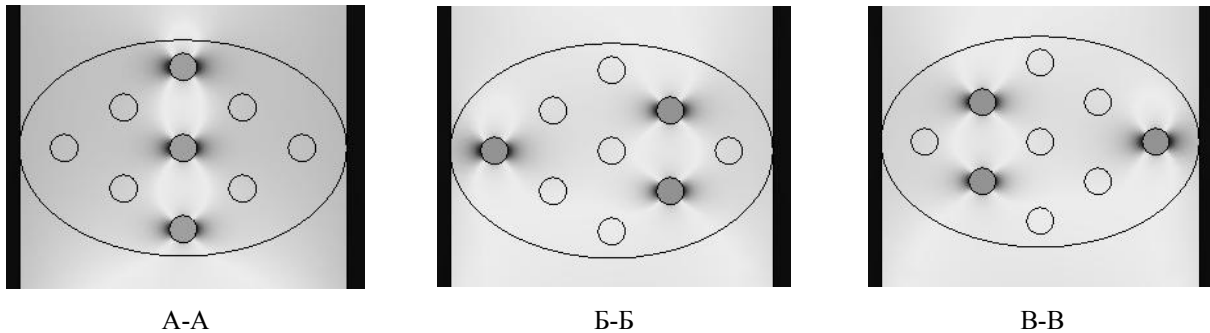


Рис. 7. Визуалізація напруженності поля в різних сеченнях каналу

ВЫВОДЫ

В работе описаны силы, действующие на наночастицу в липидной оболочке. Предложена конструкция высокоградиентной матрицы с составными стержнями, позволяющая осуществлять высокоэффективную сепарацию наночастиц в липидных оболочках. Математическим моделированием осуществлена визуализация напряженности магнитного поля в разных сечениях сепарационного канала.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Постанова КМУ від 28.10.2009 №1231 Про затвердження Державної цільової науково-технічної програми "Нанотехнології та наноматеріали" на 2010-2014 р.
2. Gerber R. High Gradient Magnetic Separation / R.R. Birss // Research Studies Press, London. – 1983.
3. Šafárik Ivo Large-scale separation of magnetic bioaffinity adsorbents / Ptackova1 L., Šafárikova1 M. // Biotechnology Letters. – 2001. – № 23. – С. 1953-1956.
4. Buchholz B. A. Radiolysis and Hydrolysis of Magnetically Assisted Chemical Separation Particles / Nunez L., Vandegrift G.F. // Sep. Sci. Technol. – 1996. – № 31. – С. 1933.
5. Moeser G.D. Colloidal Magnetic Fluids as Extractants for Chemical Processing Applications // PhD Thesis, Massachusetts Institute of Technology, Cambridge. – 2003.
6. Moeser G.D. Hatton High-Gradient Magnetic Separation of Coated Magnetic Nanoparticles / Kaitlin A. Roach, William H. Green, Alan T. // American Institute of Chemical Engineers. – 2004. – № 50. – С. 2835-2848.
7. Svoboda J. Magnetic Techniques for the Treatment of Materials // Kluwer Academic Publishers. – 2004.
8. Fletcher D. Fine Particle High Gradient Magnetic Entrapment // IEEE Trans. Magn. – 1991. – № 27. – С. 3655.
9. Rotariu O. An in vitro study of magnetic particle targeting in small blood vessels // Phys. Med. Biol. – 2006. – №51. – С. 4869-4881.

Bibliography (transliterated): 1. Postanova KМУ vid 28.10.2009 №1231 Pro zatverdzhennya Derzhavnoi cil'ovoi naukovo-tehnichnoi programi "Nanotehnologii ta nanomateriali" na 2010-2014 r. 2. Gerber R. High Gradient Magnetic Separation / R.R. Birss // Research Studies Press, London. - 1983. 3. Šafárik Ivo Large-scale separation of magnetic

bioaffinity adsorbents / Ptackova1 L., Šafárikova1 M. // Biotechnology Letters. - 2001. - № 23. - С. 1953-1956. 4. Buchholz B. A. Radiolysis and Hydrolysis of Magnetically Assisted Chemical Separation Particles / Nunez L., Vandegrift G.F. // Sep. Sci. Technol. - 1996. - № 31. - С. 1933. 5. Moeser G.D. Colloidal Magnetic Fluids as Extractants for Chemical Processing Applications // PhD Thesis, Massachusetts Institute of Technology, Cambridge. - 2003. 6. Moeser G.D. Hatton High-Gradient Magnetic Separation of Coated Magnetic Nanoparticles / Kaitlin A. Roach, William H. Green, Alan T. // American Institute of Chemical Engineers. - 2004. - № 50. - С. 2835-2848. 7. Svoboda J. Magnetic Techniques for the Treatment of Materials // Kluwer Academic Publishers. - 2004. 8. Fletcher D. Fine Particle High Gradient Magnetic Entrapment // IEEE Trans. Magn. - 1991. - № 27. - С. 3655. 9. Rotariu O. An in vitro study of magnetic particle targeting in small blood vessels // Phys. Med. Biol. - 2006. - №51. - С. 4869-4881.

Поступила 15.12.2011

Кондратенко Игорь Петрович, д.т.н.
зав. отд. электромагнитных систем
Институт электродинамики НАН Украины
e-mail: dep7ied@ukr.net
тел. (044) 4564065

Некрасов Андрей Викторович, к.т.н., доц.
кафедра "Электрические машины и аппараты"
Кременчугский национальный университет
им. Михаила Остроградского
тел. (053) 743245

Волканин Евгений Евгеньевич
Кременчугский национальный университет
им. Михаила Остроградского
e-mail: volkaninz@yandex.ua

Kondratenko I.P., Nekrasov A.V., Volkanin E.E.

An electrical engineering system with compound bars for high-gradient magnetic separation.

The basic configurations of a high-gradient separator matrix are considered. Forces acting on nanoparticles in the separating channel are described. Modeling of the matrix element in the operating gap is conducted. A new design of the matrix with compound bars is introduced for lipid-shell nanoparticles separation.

Key words – high-gradient magnetic separation, magnetic nanoparticles, modeling.