

ОПРЕДЕЛЕНИЕ БАЛАНСА СИЛ, ДЕЙСТВУЮЩИХ НА НАНОЧАСТИЦУ В ЭЛЕКТРОТЕХНИЧЕСКОЙ СИСТЕМЕ МАГНИТНОЙ СЕПАРАЦИИ

Наведено аналітичні вирази розрахунку градієнту напруженості магнітного поля. Проведено моделювання стержня матриці в робочому проміжку магнітної системи методом кінцевих елементів. Розподіл сили магнітного поля представлено у вигляді відносного коефіцієнта. Отримано рівняння балансу сил, яке враховує характер розподілу магнітної сили.

Приведены аналитические выражения расчёта градиента напряжённости магнитного поля. Проведено моделирование стержня матрицы в рабочем зазоре магнитной системы методом конечных элементов. Распределение силы магнитного поля представлено в виде относительного коэффициента. Получено уравнение баланса сил, которое учитывает характер распределения магнитной силы.

ВВЕДЕНИЕ

На сегодняшний день нанотехнологии являются одним из самых быстроразвивающихся и перспективных направлений исследований. Магнитные наночастицы благодаря своим уникальным свойствам находят широкое применение в медицине и фармакологии [1-4]. На их основе разрабатываются новые лекарственные препараты, а также новые методы лечения и диагностики. Одной из проблем производства препаратов на основе магнитных наночастиц является получение монодисперсной фракции. Специальные методы синтеза позволяют сузить распределение по размерам наночастиц, но не всегда до нужных размеров [5]. Для этого также применяется контролируемое осаждение из раствора стабилизированных поверхностно-активными веществами наночастиц с последующим центрифугированием. Но данный процесс характеризуется низкой производительностью [6]. Для получения фракций с нужным размером частиц и удаления избытка поверхностно-активных веществ также может быть применена магнитная сепарация, поскольку фракции значительно различаются значением магнитного момента. Магнитные наночастицы относятся к слабомагнитным материалам, поэтому для разделения их на фракции необходимо применить методы, которые характеризуются высокими значениями магнитной силы. К таким методам относят, прежде всего, высокоградиентную магнитную сепарацию.

АНАЛИЗ ПРЕДЫДУЩИХ ИССЛЕДОВАНИЙ

Высокоградиентная магнитная сепарация характеризуется наличием ферромагнитных тел в рабочем зазоре, которые, намагничиваясь, создают высокие значения градиента напряжённости магнитного поля. В качестве таких тел используют стальные шары [7], сетки [8] и стержни [9].

В [10] высокоградиентная сепарация с матрицей в виде стальной сетки применялась для извлечения клеточной популяции меченой магнитным наномаркером. Также данный процесс применяется при обогащении каолина и очистке сточных вод [9, 11, 12]. Указанные технологии предназначены для удаления всех магнитных частиц из потока жидкости. В настоящее время не существует высокоградиентных сепарационных систем предназначенных для извлечения определённой фракции наночастиц, поэтому дан-

ный вопрос требует теоретических и экспериментальных исследований.

ЦЕЛЬ РАБОТЫ

Целью данной работы является определение характера распределения магнитной силы вокруг намагниченного стержня матрицы высокоградиентного сепаратора, что позволит сформулировать баланс сил, действующих на наночастицу в сепарационном канале. В свою очередь из уравнения баланса сил можно получить требуемые параметры стержня и данные для построения области извлечения.

МАТЕРИАЛ И РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Так как в данном случае задача состоит в том, чтобы извлечь определённую фракцию магнитных частиц, наиболее подходящий тип матрицы – это система ферромагнитных стержней расположенных перпендикулярно магнитному полю и ориентированных вдоль направления потока исходного препарата [13]. Известно, что сила магнитного поля прямо пропорциональна его градиенту:

$$F_m = \mu_0 m_p \text{grad} H_0, \quad (1)$$

где μ_0 – магнитная проницаемость вакуума, Н/А²; m_p – собственный магнитный момент наночастицы, А·м²; H_0 – напряженность магнитного поля, А/м.

Следовательно, для определения характера распределения силы вокруг намагниченного стержня необходимо исследовать распределение градиента напряжённости поля.

Напряжённость поля намагниченного стержня в цилиндрических координатах определена в [9]:

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

$$H_\theta = \left(\frac{M_{rod} a^2}{2r^2} - H_0 \right) \sin \theta; \quad (3)$$

$$H_z = 0,$$

где M_{rod} – намагниченность стержня матрицы, А/м, a – радиус стержня матрицы, м; r – расстояние до оси стержня матрицы, м; θ – угол, град.

На основании (2) и (3) получим выражения градиента напряжённости магнитного поля вокруг намагниченного стержня:

$$\frac{dH_r}{dr} = \frac{M_{rod} a^2}{r^3} \left(\frac{M_{rod} a^2}{2H_0 r^2} + \cos 2\theta \right); \quad (4)$$

$$\frac{dH_\theta}{d\theta} = \frac{M_{rod} a^2}{r^3} \sin 2\theta. \quad (5)$$

С помощью пакета прикладных программ [14], которые используют метод конечных элементов, выполним моделирование магнитной системы с ферромагнитным стержнем в рабочем зазоре. Примем следующие значения параметров плоскопараллельной модели, характерные для подобных систем: намагниченность полюсов магнитной системы 1520 кА/м, материал магнитопровода – магнитомягкая электротехническая сталь, магнитная проницаемость ферромагнитного стержня $\mu_r=1000$, окружающая среда – воздух ($\mu_r=1$). Результатом моделирования является визуализация градиента напряженности магнитного поля намагниченного стержня, которая показывает области притяжения (вдоль оси Ox) и отталкивания (вдоль оси Oy) для магнитных, парамагнитных и суперпарамагнитных частиц (рис. 1).

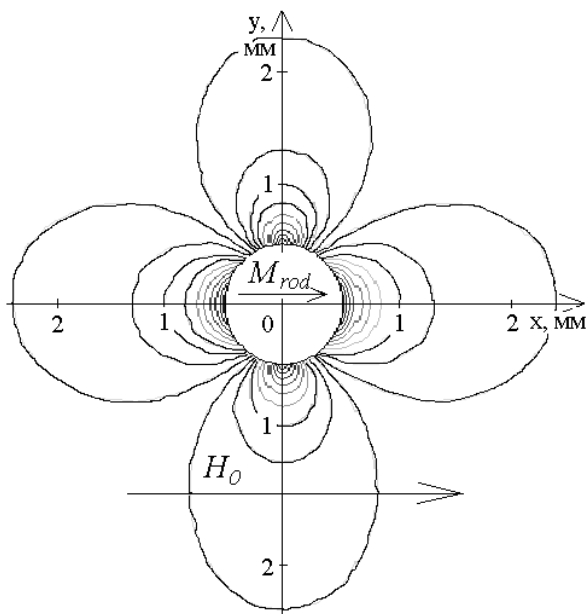


Рис. 1. Визуализация градиента напряженности магнитного поля намагниченного стержня

Известно, что при решении задач магнитостатики метод конечных элементов имеет большую достоверность. Сравним результаты, полученные по (4), (5) и результаты моделирования. Для этого удобно вести анализ распределения градиента напряженности поля вдоль оси Ox , т.е. когда $\theta = 0$. Проведём расчёт градиента напряженности магнитного поля по (4), (5) при следующих значениях: $H_0 = 1,0 \cdot 10^6$ А/м; $M_{rod} = 2,0 \cdot 10^6$ А/м; $a = 1$ мм; $\theta = 0$. Результаты расчёта и моделирования методом конечных элементов представлены на рис. 2.

На графиках распределения градиента напряженности, представленных на рис. 2, видно, что данные полученные разными способами практически совпадают. Следовательно, выражения (4), (5) могут быть использованы для определения градиента напряженности поля вокруг намагниченного стержня.

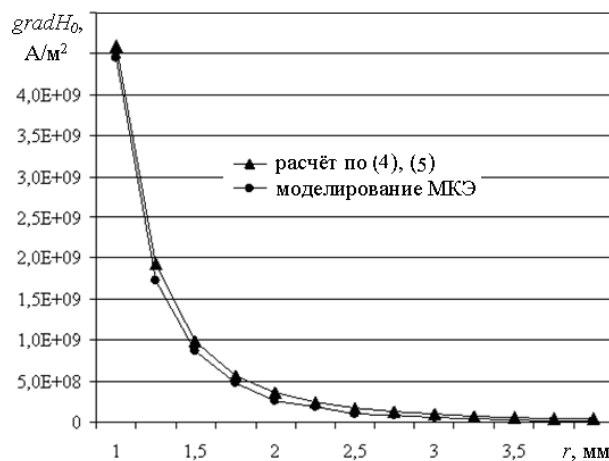


Рис. 2. Распределение градиента напряженности поля намагниченного стержня вдоль оси Ox

Представим распределение градиента напряженности в относительном виде. Согласно методологии, применённой в [9], отношение расстояния от оси стержня к его радиусу определяется коэффициентом:

$$r_a = \frac{r}{a}. \quad (6)$$

Относительный градиент можно представить как отношение градиента напряженности в точке, удалённой от оси стержня с радиусом a на расстояние r ($grad H_{ra}$) к максимальному градиенту ($grad H_{max}$), который наблюдается на поверхности стержня ($r_a=1$). Фактически, относительный градиент показывает, как уменьшается сила магнитного поля по мере удаления от поверхности стержня матрицы:

$$k_F = \frac{F_{mra}}{F_{mmax}} = \frac{grad H_{ra}}{grad H_{max}}, \quad (7)$$

где k_F – коэффициент уменьшения магнитной силы; F_{mra} – сила магнитного поля в точке удалённой от оси стержня с радиусом a на расстояние r , Н; F_{mmax} – сила магнитного поля на поверхности стержня, Н.

Выполним моделирование методом конечных элементов рабочего зазора магнитной системы шириной w , а также намагниченного стержня в рабочем зазоре (рис. 3). При намагниченности полюсов магнитной системы 1520 кА/м значение напряженности поля в рабочем зазоре составляет $1,0 \cdot 10^6$ А/м (рис. 3,а), а намагниченность стержня матрицы при этом: $2,0 \cdot 10^6$ А/м (рис. 3,б).

Анализ результатов моделирования показал, что при напряженности магнитного поля в рабочем зазоре (H_0) меньшей либо равной напряженности, необходимой для намагничивания ферромагнитного стержня до насыщения (H_s), выполняется равенство:

$$M_{rod} = 2H_0. \quad (8)$$

В [15] показано, что увеличение напряженности магнитного поля в рабочем зазоре высокоградиентного сепаратора более 1000 кА/м (т.е. $H_0 > H_s$) не приводит к увеличению магнитной силы, так как магнитные частицы в сепарируемом продукте и материал матрицы достигают состояния магнитного насыщения.

Следовательно, магнитная система высокоградиентного сепаратора наночастиц по фракциям должна создать напряженность поля, значение которого доста-

точно для намагничивания наночастиц до насыщенного состояния (не менее 400кА/м [16]) и в то же время не превышать значения, при котором стержни матрицы намагничиваются до насыщения (1000кА/м [15]).

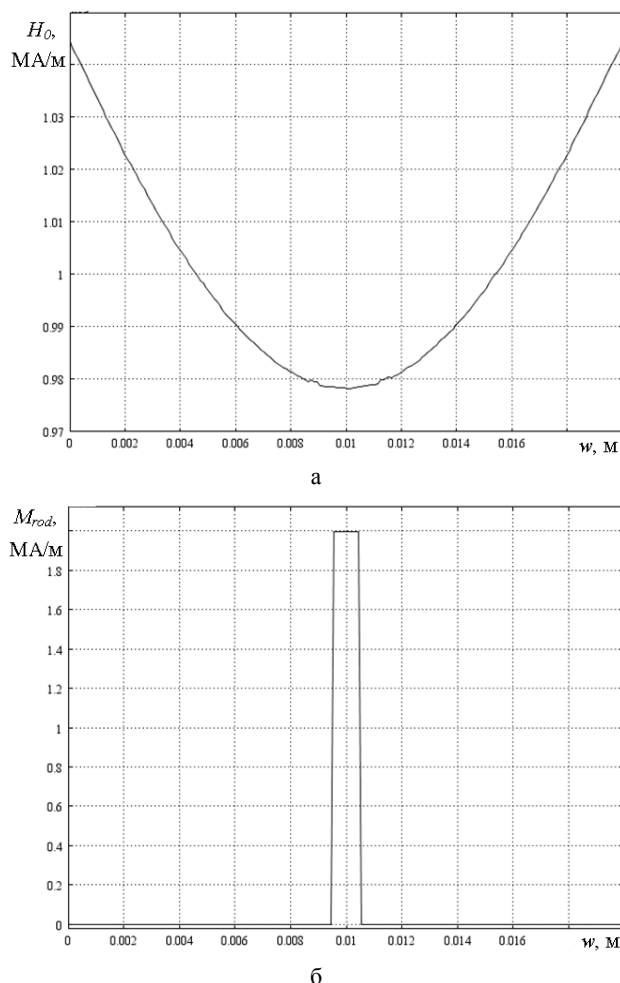


Рис. 3. Результаты моделирования методом конечных элементов: а – напряжённость поля в рабочем зазоре магнитной системы; б – намагниченность стержня в рабочем зазоре

Коэффициент уменьшения магнитной силы при условии $H_0 \leq H_s$ с учётом (4), (6), (8):

$$k_F = \frac{1}{2r_a^3} \left(\frac{1}{r_a^2} + 1 \right). \quad (9)$$

Полученный коэффициент позволяет сформулировать уравнение баланса сил, действующих на наночастицу заданной фракции, вдоль оси Ox :

$$k_F \sum F = F_m, \quad (10)$$

где $\sum F$ – сумма конкурирующих сил, действующих на частицу в потоке жидкости, Н.

Перепишем (10) учитывая (1), (4), (6), (8):

$$k_F \sum F = \frac{\mu_0 m_p M_{rod}}{r_a^3 a} \left(\frac{1}{r_a^2} + \cos 2\theta \right). \quad (11)$$

С помощью уравнения (11) можно определить радиус ферромагнитного стержня матрицы для извлечения наночастиц с известным значением магнитного момента. Решая (11) для стержня с определённым радиусом, при различных значениях θ , получим профиль области извлечения наночастиц заданной фракции.

ВЫВОДЫ

Данные, полученные моделированием методом конечных элементов, и расчёт по аналитическим зависимостям показывают практически точное совпадение значения градиента напряжённости поля вокруг намагниченного стержня матрицы. С помощью аналитических зависимостей значения градиента напряжённости и результатов моделирования получен относительный коэффициент уменьшения магнитной силы. Сформулировано уравнение баланса сил, которое позволяет рассчитать область извлечения, а также радиус стержня матрицы.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Михайлов Г.А., Васильева О.С. Технология будущего: использование магнитных наночастиц в онкологии // Бюл. Сиб. отд. РАМН. – 2008. – №3 (131). – С. 18-22.
2. Першина А.Г., Сазонов А.Э., Мильто И.В. Использование магнитных наночастиц в биомедицине // Бюллетень сибирской медицины. – 2008. – №2. – С. 7078.
3. Ito A., Shinkai M., Honda H., Kobayashi T. Medical application of functionalized magnetic nanoparticles. Review. J. Bioscience Bioengineering, 2005, no.1, pp. 1-11.
4. Pankhurst Q.A., Connolly J., Jones S.K., Dobson J. Applications of magnetic nanoparticles in biomedicine. Topical review. J. Phys. D: Appl. Phys., 2003, no.36, pp. 167-181.
5. Губин С.П., Кокшаров Ю.А., Хомутов Г.Б., Юрков Г.Ю. Магнитные наночастицы: методы получения, строение, свойства // Успехи химии. – 2005. – №74. – С. 539-574.
6. Баранов Д.А., Губин С.П. Магнитные наночастицы: достижения и проблемы химического синтеза // Радиоэлектроника. Наносистемы. Информационные Технологии. – 2009. – №1. – С. 129-147.
7. Мясников Н.Ф. Полиградиентные магнитные сепараторы. М.: Недра, 1973.
8. Svoboda J. Magnetic Techniques for the Treatment of Materials. Kluwer Academic Publishers, 2004.
9. Gerber R., Birss R.R. High Gradient Magnetic Separation. Research Studies Press, London, 1983.
10. Šafarik Ivo, Ptackova L., Šafarikova M. Large-scale separation of magnetic bioaffinity adsorbents. Biotechnology Letters, 2001, no.23, pp. 1953-1956.
11. Buchholz B.A., Nunez L., Vandegrift G.F. Radiolysis and Hydrolysis of Magnetically Assisted Chemical Separation Particles. Sep. Sci. Technol., 1996, no.31, pp. 1933.
12. Moeser G.D. Colloidal Magnetic Fluids as Extractants for Chemical Processing Applications. PhD Thesis, Massachusetts Institute of Technology, Cambridge, 2003.
13. Кондратенко И.П., Некрасов А.В., Волканин Е.Е. Электротехническая система с составными стержнями для высокоградиентной магнитной сепарации // Электротехника і електромеханіка. – 2012. – №2. – С. 38-41.
14. Электронный ресурс: www.comsol.com.
15. Nadja Schultz. Application of magnetic separation technology for the recovery and re-use of immobilised lipase of Candida antarctica A-type. PhD Thesis, Institut für Bio- und Lebensmitteltechnik Technische Biologie Karlsruhe, 2007.
16. 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.

Bibliography (transliterated): 1. Mihajlov G.A., Vasil'eva O.S. Tehnologija budushhego: ispol'zovanie magnitnyh nanochastic v onkologii. *Bulletin Sib. otd. RAMS*, 2008, no.3(131), pp. 18-22. 2. Pershina A.G., Sazonov A. Je., Mil'to I.V. Ispol'zovanie magnitnyh nanochastic v

biomedicine. *Bulletin sibirskoj mediciny*, 2008, no.2, pp. 7078. **3.** Ito A., Shinkai M., Honda H., Kobayashi T. Medical application of functionalized magnetic nanoparticles. Review. *J. Bioscience Bioengineering*, 2005, no.1, pp. 1-11. **4.** Pankhurst Q.A., Connolly J., Jones S.K., Dobson J. Applications of magnetic nanoparticles in biomedicine. Topical review. *J. Phys. D: Appl. Phys.*, 2003, no.36, pp. 167-181. **5.** Gubin S.P., Koksharov Yu.A., Homutov G.B., Yurkov G.Yu. Magnitnye nanochasticy: metody polucheniya, stroenie, svojstva. *Uspehi himii*, 2005, no.74, pp. 539-574. **6.** Baranov D.A., Gubin S.P. Magnitnye nanochasticy: dostizheniya i problemy himicheskogo sinteza. *Radioelektronika. Nanosistemy. Informacionnye Tehnologii*, 2009, no.1, pp. 129-147. **7.** Mjasnikov N.F. *Poligradientnye magnitnye separatory*. Moscow, Nedra Publ., 1973. **8.** Svoboda J. *Magnetic Techniques for the Treatment of Materials*. Kluwer Academic Publishers, 2004. **9.** Gerber R., Birss R.R. *High Gradient Magnetic Separation*. Research Studies Press, London, 1983. **10.** Šafarik Ivo, Ptackova L., Šafarikova M. Large-scale separation of magnetic bioaffinity adsorbents. *Biotechnology Letters*, 2001, no.23, pp. 1953-1956. **11.** Buchholz B.A., Nunez L., Vandegriff G.F. Radiolysis and Hydrolysis of Magnetically Assisted Chemical Separation Particles. *Sep. Sci. Technol.*, 1996, no.31, pp. 1933. **12.** Moeser G.D. *Colloidal Magnetic Fluids as Extractants for Chemical Processing Applications*. PhD Thesis, Massachusetts Institute of Technology, Cambridge, 2003. **13.** Kondratenko I.P., Nekrasov A.V., Volkanin E.E. An electrical engineering system with compound bars for high-gradient magnetic separation. *Electrical engineering & electromechanics*, 2012, no.2, pp. 38-41. **14.** Available at: www.comsol.com (accessed 23 June 2013). **15.** Nadja Schultz. *Application of magnetic separation technology for the recovery and re-use of immobilised lipase of Candida antarctica A-type*. PhD Thesis, Institut für Bio- und Lebensmitteltechnik Technische Biologie Karlsruhe, 2007. **16.** Kirilenko A.V., Chehun V.F., Podoltsev A.D., Kondratenko I.P., Kucherjavaya I.N., Bondar V.V., Shpilevaya S.I., Todor I.N. Analiz silovogo vozdejstvija vysokogradientnogo magnitnogo polja na magnitnye nanochasticy v potoke zhidkosti. *Theses of National Academy of Sciences of Ukraine*, 2010, no.9, pp. 162-172.

Поступила (received) 20.09.2013

*Волканин Евгений Евгеньевич¹, аспирант,
Некрасов Андрей Викторович¹, к.т.н., доц.,
Оксанич Анатолий Петрович¹, д.т.н., проф.,
Ляшенко Виктор Павлович¹, д.т.н., доц.,*

¹Кременчугский национальный университет
им. Михаила Остроградского,
39600, Полтавская обл., Кременчуг, ул. Первомайская, 20,
тел/phone +38 053 743245, e-mail: volkaninz@yandex.ua

E.E. Volkanin¹, A.V. Nekrasov¹, A.P. Oksanych¹, V.P. Ljashenko¹

¹Kremenchuk Mykhailo Ostrohradskyi National University
20, Pershotravneva Str., Kremenchuk, Poltava region, 39600, Ukraine

Determination of nanoparticle force balance in an electrical magnetic separation system.

Analytical expressions for magnetic force gradient computation are given. FEM simulation of the matrix core in the working gap of a magnetic system is conducted. The magnetic force distribution is presented as a relative ratio. A force balance equation taking into account the magnetic force pattern is derived.

Key words – high gradient magnetic separation, magnetic nanoparticles, magnetic field gradient.