

УДК 621.928.8

## ИССЛЕДОВАНИЕ ВОЗМОЖНОСТИ ПРИМЕНЕНИЯ ЧЕТЫРЁХПОЛЮСНОГО СЕПАРАТОРА ДЛЯ РАЗДЕЛЕНИЯ НАНОЧАСТИЦ

**А. М. Андрусенко, А. П. Оксанич, В. Р. Петренко, Е. Е. Волканин**

Кременчугский национальный университет имени Михаила Остроградского  
ул. Первомайская, 20, г. Кременчуг, 39600, Украина. E-mail: volkaninz@yandex.ua

Описаны преимущества и области применения магнитной сепарации. Указаны основные недостатки высокоградиентной сепарации, которых лишены четырёхполюсные сепараторы. Исследование магнитной системы проводилось с использованием конечно-элементных методов математического моделирования дифференциальных уравнений в частных производных. Создана двумерная плоскопараллельная модель четырёхполюсного сепаратора. Методами моделирования показана возможность разделения фракций нанометрового диапазона.

**Ключевые слова:** магнитный сепаратор, наночастицы, высокоградиентное поле.

## ДОСЛІДЖЕННЯ МОЖЛИВОСТІ ЗАСТОСУВАННЯ ЧОТИРИПОЛЮСНОГО СЕПАРАТОРА ДЛЯ РОЗДІЛЕННЯ НАНОЧАСТИНОК

**О. М. Андрусенко, А. П. Оксанич, В. Р. Петренко, Є. Є. Волканін**

Кременчуцький національний університет імені Михайла Остроградського  
вул. Першотравнева, 20, м. Кременчук, 39600, Україна. E-mail: volkaninz@yandex.ua

Описано переваги й області застосування магнітної сепарації. Вказано основні недоліки високоградієнтної сепарації, яких позбавлені чотириполюсні сепаратори. Дослідження магнітної системи проводилося з використанням кінцево-елементних методів математичного моделювання диференціальних рівнянь у приватних похідних. Створено двомірну плоскопаралельну модель чотириполюсного сепаратора. Методами моделювання показано можливість розділення фракцій нанометрового діапазону.

**Ключові слова:** магнітний сепаратор, наночастинок, високоградієнтне поле.

**АКТУАЛЬНОСТЬ РАБОТЫ.** Магнитные методы обработки находят широкое применение в таких разнообразных областях, как обработка минералов, переработка отходов и биомедицина. С помощью магнитной сепарации можно обрабатывать широкий круг материалов – от парамагнитных до ферромагнитных, от коллоидных и до частиц больших размеров. Основным преимуществом обработки материалов в магнитном поле является то, что применяемой магнитной силой можно управлять в широком диапазоне значений [1]. Эта сила также может налагаться на другие физические силы, и несколько физических свойств материалов могут использоваться одновременно. Кроме того, магнитная сепарация – это экологически чистая технология.

Наночастицы магнетита ( $Fe_3O_4$ ) используются как адсорбирующий материал при магнитной сепарации биологических жидкостей [2, 3], при очистке воды от тяжелых металлов и трихлорэтилена [4]. Один из этапов производства нанокompозита для биомедицины также предусматривает магнитную сепарацию для удаления избытка поверхностно-активных веществ [5]. Традиционно для таких задач используется высокоградиентная сепарация [5–7].

В высокоградиентных сепараторах локальный высокий градиент магнитного поля генерируется намагниченными ферромагнитными телами (матрицами), помещёнными в поле сепаратора. Данной технологии присущи два фундаментальных недостатка:

– максимальное магнитное поле ограничено магнитным насыщением материала матрицы, и повышать его дальше практически невозможно;

– магнитные частицы задерживаются матрицей, и для разгрузки необходим цикл промывки, что снижает производительность.

Указанных недостатков лишена система четырёхполюсного сепаратора.

Целью данной работы является исследование возможности применения четырёхполюсного сепаратора для разделения наночастиц.

**МАТЕРИАЛ И РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ.** В качестве метода исследования выбран метод компьютерного моделирования силового воздействия неизменного во времени магнитного поля. Четырёхполюсное магнитное поле характеризуется эффективным использованием магнитной энергии и линейной зависимостью магнитной силы от пространственных координат [8]. Четырёхполюсная система сепарации применялась для очистки мелкой фракции угля [8], а также для отделения маркированных магнетитом периферийных лимфоцитов [9]. В качестве системы для разделения наночастиц четырёхполюсные сепараторы не применялись, и этот вопрос требует дальнейших исследований.

В предложенном сепараторе четыре полюса фокусируют магнитное поле вокруг центральной цилиндрической области (рис. 1). Цилиндрический концентрический отделитель потока расположен в нижней части сепарационного канала. Вдоль оси расположен ферромагнитный стержень, который увеличивает градиент поля. В процессе работы исходный раствор движется сквозь магнитную систему. Магнитные наночастицы отклоняются к внешней стенке канала и попадают в отделитель. Таким способом и осуществляется сепарация.

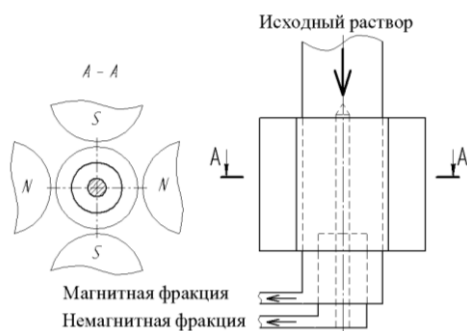


Рисунок 1 – Четырёхполюсный сепаратор

На наночастицу магнетита в рабочем объеме сепаратора кроме силы магнитного поля воздействуют также силы диполь-дипольного взаимодействия, сила диффузии, инерции, гравитации и гидродинамическая сила. Решающим фактором для успешной сепарации является баланс силы магнитного поля и гидродинамической силы. Гидродинамическая сила получена из уравнения Стокса:

$$F_d = 6\pi\eta b v_0, \quad (1)$$

где  $\eta$  – динамическая вязкость жидкости;  $b$  – радиус магнитной частицы;  $v_0$  – скорость потока.

Магнитная сила, действующая на магнитную наночастицу, пропорциональна приложенному полю и градиенту поля [10]:

$$F_m = V_p \chi \nabla \frac{|B_0|^2}{2\mu_0}, \quad (2)$$

где  $\chi$  – объёмная магнитная восприимчивость частицы;  $V_p$  – объём частицы;  $B_0$  – плотность магнитного поля;  $\nabla(B^2/2\mu_0)$  – градиент энергии магнитного поля;  $\mu_0$  – магнитная проницаемость вакуума.

В четырехполюсном сепараторе после ряда математических преобразований магнитную силу можно представить в виде [9]

$$F_m = V_p \chi \left( \frac{B_0^2}{\mu_0 r_0} \right) \frac{r}{r_0}, \quad (3)$$

где  $r_0$  – расстояние от центра системы к полюсному наконечнику;  $r$  – координата частицы.

Для получения максимального значения магнитной силы необходимо стремиться как к увеличению магнитной индукции  $B_0$ , так и к увеличению степени неоднородности распределения поля в активной зоне, т.е. стремиться к увеличению значения вектора  $\nabla B_0^2$  [10].

Моделирование четырёхполюсной магнитной системы проведено численным методом конечных элементов с использованием пакета прикладных программ Comsol [11]. Основные параметры плоскопараллельной модели магнитной системы: полюса – постоянные магниты Nd-Fe-B коэрцитивная сила  $H_c=1000\text{кА/м}$ ; относительная магнитная проницаемость магнитопровода и центрального стержня  $\mu_r=4000$ , сепарационный канал  $d=12\text{мм}$ .

Пакет COMSOL Multiphysics позволяет моделировать практически все физические процессы, которые описываются частными

дифференциальными уравнениями (УРЧП). В данном случае нас интересует распределение магнитной индукции в канале сепарации (рис. 2) – она должна быть достаточной для намагничивания магнитных наночастиц до насыщения.

Для дальнейшего анализа магнитной системы воспользуемся методологией, описанной в [10]. Из выражения (2) выделяется векторная функция точки пространства  $G(r) = \nabla|B_0|^2/(2\mu_0)$ , численно равная магнитной силе, действующей на частицу единичного объема, с восприимчивостью  $\chi = 1$  и расположенную в этой точке. Силовая функция неоднородного магнитного поля (рис. 3, 4) является внутренней характеристикой поля и будет исследоваться для разработанной магнитной системы.

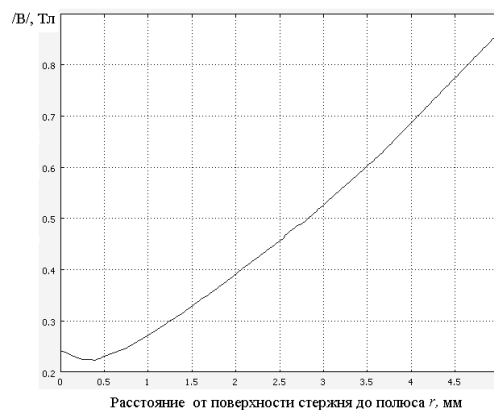


Рисунок 2 – График распределения магнитной индукции

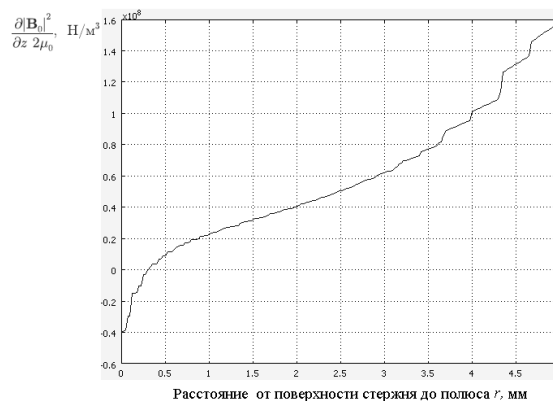


Рисунок 3 – График распределения векторной силовой функции

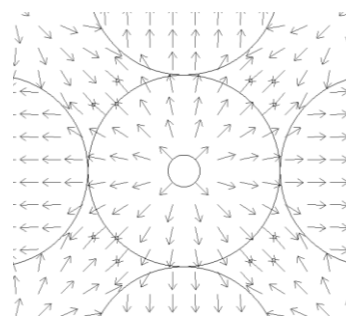


Рисунок 4 – Визуализация векторного поля в сепарационном канале

**ВЫВОДЫ.** Анализ компьютерной модели позволяет предположить, что энергия магнитного поля в предложенном сепараторе достаточна для намагничивания наночастиц до насыщения. Сила поля практически линейно увеличивается от центра канала к стенкам. При определенной скорости движения исходного раствора магнитные частицы будут отклоняться под действием сил поля в направлении от центра к периферии. Результативность предложенной системы необходимо проверить опытным путём.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Svoboda J. *Magnetic Techniques for the Treatment of Materials* // Kluwer Academic Publishers. – 2004. – 641 p.
2. Schwalbe M., Pachmann K., Hoffken K., Clement J. Improvement of the separation of tumour cells from peripheral blood cells using magnetic nanoparticles // *J. Phys.: Condens. Matter.* – 2006. – № 18. – PP. 2865–2876.
3. Ito A., Honda H., Kobayasi T. Medical application of functionalized magnetic nanoparticles // *J. Biosci. Bioengng.* – 2005. – № 1. – PP. 1–11.
4. Low-field magnetic separation of monodisperse Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub> nanocrystals / Y.T. Cafer, J.T. Mayo, W.Yu. William, A. Prakash // *Science.* – 2006. – № 314. – PP. 964–967.

5. Кондратенко И.П., Некрасов А.В., Волканин Е.Е. Исследование магнитогидродинамического сепаратора // *Електромеханічні і енергозберігаючі системи.* – 2011. – № 3. – С. 107–109.

6. Ditsch A., Lindenmann S., Laibinis P. High-gradient magnetic separation of magnetic nanoclusters. // *Ind. Eng. Chem. Res.* – 2005. – Iss. 44. – PP. 6824–6836.

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

8. Doctor R.D., Panchal C.B., Swietlik C.E., Recent Advances in Separation Techniques-III. // *AICHe Symp.* – 1986. – Ser. 82. – P. 154.

9. Zborowski M., Hafeli U., Schuett W., Teller J. (Eds.). *Scient. and Clinical Applications of Magnetic Microcarriers.* – New York: Plenum Press, 1997. – PP. – 224–230.

10. 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. – № 9. – С. 162–172.

11. Comsol Multiphysics, version 3.3. – Mode of access: [www.comsol.com](http://www.comsol.com).

#### EXAMINATION OF POSSIBILITY OF APPLICATION QUADRIPOLE SEPARATOR FOR PARTITIONING NANOPARTICLES

**O. Andrusenko, A. Oksanich, V. Petrenko, E. Volkanin**

Kremenchuk Mykhailo Ostrohradskyi National University  
ul. Pervomayskaya, 20, Kremenchug, 39600, Ukraine. E-mail: [volkaninz@yandex.ua](mailto:volkaninz@yandex.ua)

In the given operation advantages and scopes of a magnetic classification are featured. The basic deficiencies high gradient are specified a classification. Quadripole separators are deprived the specified deficiencies. Examination of magnetic system was spent with use of is terminating-element methods mathematical model operations of the differential equations in partial differential coefficients. The bidimensional plane-parallel model of a quadripole separator is created. By modelling methods possibility of partitioning of fractions nanoscale a gamut is shown.

**Key words:** magnetic separator, nanoparticles, high gradient field.

#### REFERENCES

1. Svoboda J. *Magnetic Techniques for the Treatment of Materials* // Kluwer Academic Publishers. – 2004. – 641 p.

2. Schwalbe M., Pachmann K., Hoffken K., Clement J. Improvement of the separation of tumour cells from peripheral blood cells using magnetic nanoparticles // *J. Phys.: Condens. Matter.* – 2006. – № 18. – PP. 2865–2876.

3. Ito A., Honda H., Kobayasi T. Medical application of functionalized magnetic nanoparticles // *J. Biosci. Bioengng.* – 2005. – № 1. – PP. 1–11.

4. Low-field magnetic separation of monodisperse Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub> nanocrystals / Y.T. Cafer, J.T. Mayo, W.Yu. William, A. Prakash // *Science.* – 2006. – № 314. – PP. 964–967.

5. Kondratenko I.P., Nekrasov A.V., Volkanin E.E. The study magnetohydrodynamic separator // *Problems Energy Saving in electrical systems. Science, education and practice.* – № 1/2011 (1). – PP. 107–109. [in Russian]

6. Ditsch A., Lindenmann S., Laibinis P. High-gradient magnetic separation of magnetic nanoclusters. // *Ind. Eng. Chem. Res.* – 2005. – Iss. 44. – PP. 6824–6836.

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

8. Doctor R.D., Panchal C.B., Swietlik C.E., Recent Advances in Separation Techniques-III. // *AICHe Symp.* – 1986. – Ser. 82. – P. 154.

9. Zborowski M., Hafeli U., Schuett W., Teller J. (Eds.). *Scient. and Clinical Applications of Magnetic Microcarriers.* – New York: Plenum Press, 1997. – PP. – 224–230.

10. Kyrilenko A.V., Chekhun V. F., Podoltsev A.D. Analysis of the force action of a high-gradient magnetic field on magnetic nanoparticles in a flowing fluid // *Reports of the National Academy of Sciences of Ukraine.* – 2010. – № 9. – PP. 162–172. [in Russian]

11. Comsol Multiphysics, version 3.3. – Mode of access: [www.comsol.com](http://www.comsol.com).

Стаття надійшла 18.02.2012.

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