

УДК 621.928.8

МОДЕЛЮВАННЯ ЧОТИРИПОЛЮСНОГО МАГНІТНОГО СЕПАРАТОРА

А. В. Некрасов, Є. Є. Волканін

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

Описано технологію магнітної сепарації у галузі біомедицини. Вказано переваги чотириполусної системи сепарації над високоградієнтною системою сепарації, яка застосовується для подібних задач. Наведено приклади застосування чотириполусних магнітних систем. Описано конструкцію і принцип роботи чотириполусного сепаратора. Дослідження магнітної системи проводилося з використанням кінцево-елементних методів математичного моделювання диференціальних рівнянь у приватних похідних. Створено двовірну плоскопаралельну модель чотириполусної магнітної системи. Отримано графіки силової функції та індукції в каналі сепарації. Методами моделювання показано можливість поділу фракцій нанометрового діапазону.

Ключові слова: магнітний сепаратор, наночастинки, високоградієнтне поле.

МОДЕЛИРОВАНИЕ ЧЕТЫРЕХПОЛЮСНОГО МАГНИТНОГО СЕПАРАТОРА

А. В. Некрасов, Е. Е. Волканин

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

Описана технология магнитной сепарации в области биомедицины. Указаны преимущества четырехполусной системы сепарации над высокоградиентной системой сепарации, которая применяется для подобных задач. Приведены примеры применения четырехполусных магнитных систем. Описана конструкция и принцип работы четырехполусного сепаратора. Исследование магнитной системы проводилось с использованием конечно-элементных методов математического моделирования дифференциальных уравнений в частных производных. Создана двумерная плоскопараллельная модель четырехполусной магнитной системы. Получены графики силовой функции и индукции в канале сепарации. Методами моделирования показана возможность разделения фракций нанометрового диапазона.

Ключевые слова: магнитный сепаратор, наночастицы, высокоградиентное поле.

АКТУАЛЬНІСТЬ РОБОТИ. Магнітна сепарація знаходить застосування в таких галузях науки, як клітинна та молекулярна біологія, мікробіологія та біохімія. Досліджується можливість застосування магнітної технології для іммобілізації, ізоляції та видалення ряду біологічно активних з'єднань та клітин – приклади галузей, в яких магнітна апаратура знаходить все більше застосування [1].

При виготовленні нанокompозиту для біомедичних застосувань існує цикл відокремлення надлишків поверхнево активних речовин. Ефективним засобом є застосування високоградієнтної магнітної сепарації [2–4], але дана технологія має два фундаментальних недоліки:

- магнітні частинки затримуються матрицею (намагнічені феромагнітні тіла), і для її розвантаження необхідно цикл промивання, що знижує продуктивність;

- максимальне магнітне поле обмежено магнітним насиченням матеріалу матриці, і збільшити його практично неможливо.

Магнітний сепаратор з чотириполусною системою вказаних недоліків позбавлений.

Метою роботи є моделювання чотириполусної магнітної системи, визначення рівня індукції та силової функції в сепараційному каналі.

МАТЕРІАЛ І РЕЗУЛЬТАТИ ДОСЛІДЖЕНЬ.

Чотириполусна магнітна система застосовувалась у мас-спектрометричному аналізі [5] для очищення дрібної фракції вугілля [6] та для відокремлення маркованих магнетитом периферійних лімфоцитів [7]. Магнітне поле, що створюється чотириполусною системою, характеризується ефективним використанням магнітної енергії та практично лінійною залежністю від радіальної координати. Чотирипо-

лусні сепаратори не застосовувались раніше для відокремлення наночастинок, тому це питання вимагає додаткового дослідження. Дослідження проводилось методом комп'ютерного моделювання силового впливу незмінного в часі магнітного поля.

У запропонованому сепараторі чотири полюси утворюють магнітне поле, що сконцентроване в сепараційному каналі. Сепараційний канал розташований співвісно з магнітною системою (рис. 1).

Концентричні відокремлювачі потоку розташовано в нижній та верхній частинах сепараційного каналу. Вздовж вісі розташовано феромагнітний стрижень, який збільшує градієнт поля. Вихідний розчин (наночастинки в ліпідних оболонках, немагнітні надлишки ліпиду та розчинник) подається у внутрішню частину сепараційного каналу. В зовнішню частину подається розчинник. Під впливом поля магнітні частинки рухаються від центру до периферії каналу і потрапляють у нижній відокремлювач потоку.

Основним фактором, що впливає на процес сепарації, є баланс сили магнітного поля та гідродинамічної сили. Гідродинамічна сила описується рівнянням Стокса:

$$F_d = 6\pi\eta b v_0, \tag{1}$$

де η – динамічна в'язкість розчинника; b – радіус магнітної частинки; v_0 – швидкість потоку.

Магнітна сила, що діє на магнітну наночастинку, пропорційна прикладеному полю і градієнту поля [8]:

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

де χ – об'ємна магнітна сприйнятливості частинки; V_p – об'єм частинки; B_0 – магнітна індукція поля; $\nabla(B_0^2/2\mu_0)$ – градієнт магнітного поля; μ_0 – магнітна проникність вакууму.

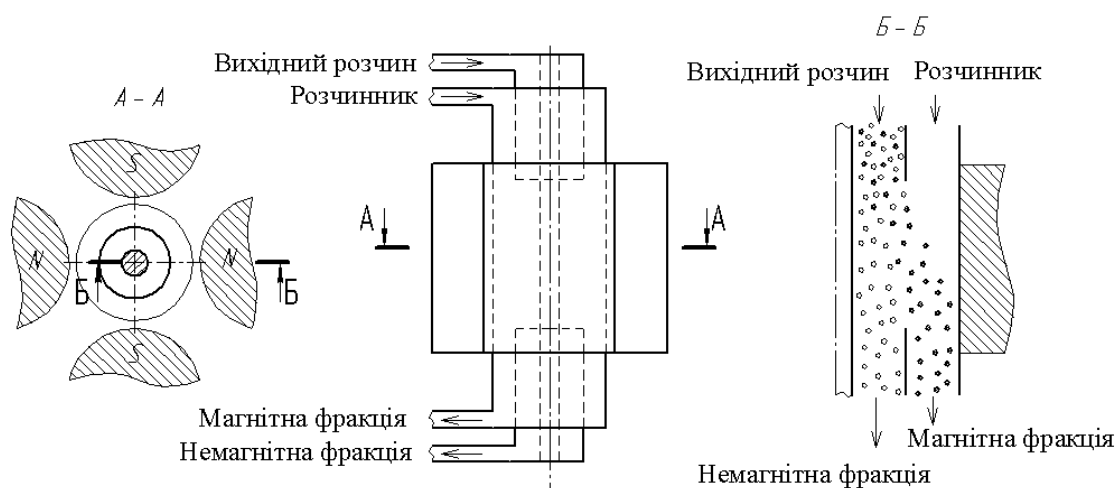


Рисунок 1 – Чотириполюсний сепаратор

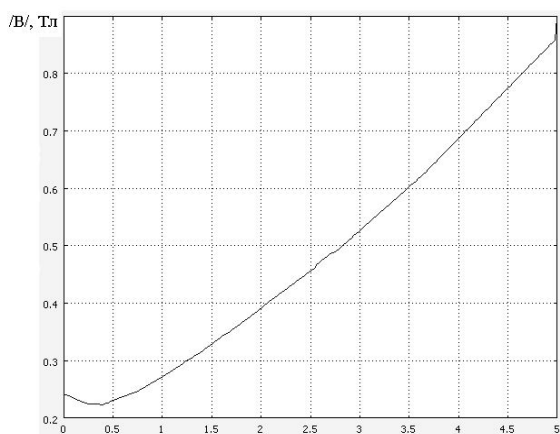
У чотириполюсній магнітній системі після ряду математичних перетворювань магнітну силу можливо надати у вигляді [7]

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

де r_0 – відстань від центра системи до полюсного наконечника; r – координата частинки.

Моделювання чотириполюсної магнітної системи проведено чисельним методом кінцевих елементів з використанням пакета прикладних програм Comsol [9]. Основні параметри плоскопаралельної моделі магнітної системи: полюси – постійні магніти Nd-Fe-B (коерцитивна сила $H_c = 1000$ кА/м); відносна магнітна проникність магнітопроводу і центрального стрижня $\mu_r = 4000$; сепараційний канал $d = 12$ мм.

Методом моделювання отримано графік розподілу магнітної індукції в каналі сепарації (рис. 2) – її мінімальна величина достатня для намагнічування магнітних наночасток до насичення.

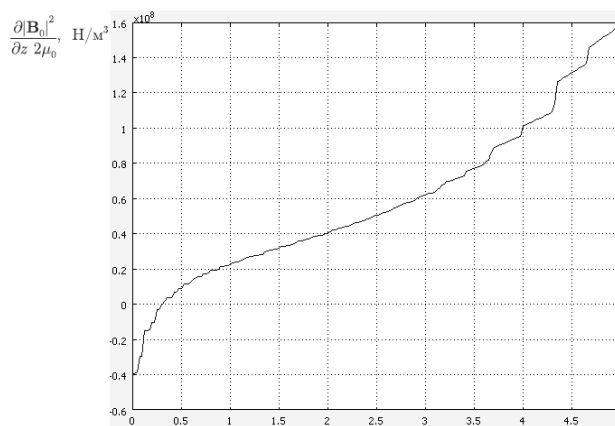


Відстань від поверхні стрижня до полюса r , мм

Рисунок 2 – Графік розподілу магнітної індукції

З виразу (2) виділяється векторна функція точки простору $G(r) = \nabla |B_0|^2 / (2\mu_0)$, яка чисельно дорівнює магнітній силі, що діє на частинку одиничного об'єму зі сприйнятливістю $\chi = 1$, і розташованій у цій точці [8]. Силовa функція неоднорідного магніт-

ного поля (рис. 3, 4) є внутрішньою характеристикою поля й буде досліджуватися для розробленої магнітної системи.



Відстань від поверхні стрижня до полюса r , мм

Рисунок 3 – Графік розподілу векторної силової функції

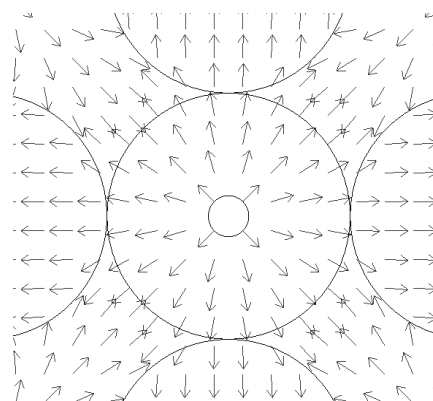


Рисунок 4 – Візуалізація векторного поля в сепараційному каналі

Для отримання максимального значення магнітної сили необхідно прагнути як до збільшення магнітної індукції B_0 , так і до збільшення ступеню неоднорідності розподілу поля в активній зоні, тобто прагнути до збільшення значення вектора $\nabla |B_0|^2$.

ВИСНОВКИ. Моделювання чотириполусної магнітної системи дозволило встановити, що енергія магнітного поля в запропонованому сепараторі достатня для намагнічування наночастинок до насичення. Сила поля практично лінійно збільшується від центру каналу до стінок, що узгоджується з теоретичним виразом (3). За певною швидкістю руху вихідного розчину та розчинника магнітні частинки будуть відхилятися під дією сил поля в напрямку від центру до периферії.

ЛІТЕРАТУРА

1. Svoboda J. *Magnetic Techniques for the Treatment of Materials* // Kluwer Academic Publishers. – 2004. – 641 p.
2. Кондратенко И.П., Некрасов А.В., Волканин Е.Е. Исследование магнитогидродинамического сепаратора // *Електромеханічні і енергозберігаючі системи*. – 2011. – № 3. – С. 107–109.
3. Ditsch A., Lindenmann S., Laibinis P. High-gradient magnetic separation of magnetic nanoclusters. // *Ind. Eng. Chem. Res.* – 2005. – Iss. 44. – PP. 6824–6836.

4. 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.

5. Dawson P.H. *Quadrupole Mass Spectrometry and its Applications* // American Institute of Physics. – 1997. – 349 p.

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

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

8. 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.

9. Comsol Multiphysics, version 3.3. – Mode of access: www.comsol.com.

MODELLING OF QUADROPOLAR MAGNETIC SEPARATOR

A. Nekrasov, E. Volkanin

Kremenchuk Mykhailo Ostrohradskyi National University

vul. Pershotravneva, 20, Kremenchuk, 39600, Ukraine. E-mail: volkaninz@yandex.ua

This paper describes the technology of magnetic separation in biomedicine. These advantages, properties of quadrupolar separation system of high-gradient separation system, which is used for similar purposes. Examples of the use of quadrupolar magnetic systems. The above construction and the principle of a four separator. The study of the magnetic system was conducted with the use of finite element methods for mathematical modeling of differential equations in partial derivatives. Created a two-dimensional plane-parallel model of four-pole magnetic system. The resulting graphs of power functions and induction in the channel separation. 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. 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]

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

4. 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.

5. Dawson P.H. *Quadrupole Mass Spectrometry and its Applications* // American Institute of Physics. – 1997. – 349 p.

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

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

8. Kyrylenko 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]

9. Comsol Multiphysics, version 3.3. – Mode of access: www.comsol.com.

Стаття надійшла 24.07.2012.

Рекомендовано до друку
д.т.н., проф. Сінчуком О.М.