

## ИССЛЕДОВАНИЕ МАГНИТОГИДРОДИНАМИЧЕСКОГО СЕПАРАТОРА

*И. П. Кондратенко, д.т.н., проф.*

*Институт электродинамики Национальной академии наук Украины*

*пр. Победы, 56, 03680, г. Киев, Украина*

*E-mail: dep7ied@ukr.net*

*А. В. Некрасов, к.т.н., доц., Е. Е. Волканин, асп.*

*Кременчугский национальный университет имени Михаила Остроградского*

*ул. Первомайская, 20, 39600, г. Кременчуг, Украина*

*E-mail: volkaninz@yandex.ua*

Рассчитана траектория наночастицы в магнитном поле сепаратора. Предложена усовершенствованная конструкция сепарационного канала.

**Ключевые слова:** магнитный сепаратор, наночастицы, липид.

**Введение.** В настоящее время магнитоуправляемые липосомы на основе наночастиц магнетита применяются в биомедицине при управляемой локальной гипертермии [1] и в качестве терапевтических агентов при направленной доставке лекарств [2]. Процесс производства наночастиц в липидных оболочках состоит из следующих этапов: методом химического осаждения получают наночастицы магнетита средним размером 10 нм [3], далее в ультразвуковом поле происходит присоединение поверхностно активных веществ (ПАВ). В результате раствор будет содержать магнитоуправляемые липосомы и частицы липида, не содержащие магнитной сердцевины. Последняя фракция должна быть удалена. Наиболее простым и эффективным методом является магнитная сепарация, так как сепарируемые продукты значительно отличаются по магнитным свойствам.

**Анализ предыдущих исследований.** В работах [4, 5] исследуют возможности магнитной сепарации биологических жидкостей. Авторы детально изучают процессы связывания магнитных наночастиц с целевыми клетками. Однако непосредственно технология магнитной сепарации не разработана. Про-

блема очистки воды с помощью наночастиц магнетита исследована в работе [6], где авторы обосновывают применение магнитной сепарации в процессе очистки жидкости, но методы, которые следует применить, до конца не изучены.

**Цель работы.** Расчёт сил, действующих на магнитные липиды в сепараторе и построение траекторий их движения. Усовершенствование конструкции сепарационного канала для повышения эффективности и увеличения производительности процесса сепарации.

**Материал и результаты исследования.** Исследуемый магнитогидродинамический сепаратор конструктивно состоит из магнитной системы и сепарационного канала (рис. 1). Магнитная система замкнутого типа создаёт в рабочем зазоре однородное поле высокой напряженности ( $>5,3 \cdot 10^5$  А/м). Постоянные магниты NdFeB марки N30M с коэрцитивной силой по намагниченности  $H_{cj} \geq 970$  к А/м. Магнитопровод – магнитомягкая сталь марки 27КХ. Сепарационный канал ( $d=0,01$  м) расположен в рабочем зазоре сепаратора. В оси канала расположен ферромагнитный стержень ( $d=0,001$  м) для создания неравномерности поля.

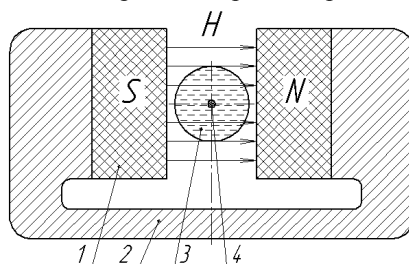


Рисунок 1 – Поперечное сечение магнитогидродинамического сепаратора:

1 – постоянный магнит; 2 – магнитопровод; 3 – сепарационный канал; 4 – ферромагнитный стержень

Процесс сепарации будет происходить следующим образом: перистальтическим насосом через сепарационный канал прокачивается исходный раствор. Магнитные частицы под действием магнитных сил будут двигаться в зону максимального градиента поля – к поверхности ферромагнитного стержня. При определённой скорости потока они будут захвачены полем на поверхности стержня. Немагнитные липосомы (избыток ПАВ) беспрепятственно

пройдут сепарационный канал. Далее сепарационный канал освобождается от магнитной системы и промывается дистиллированной водой. Полученный водный раствор будет содержать магнитные наночастицы в липидных оболочках.

С помощью метода конечных элементов (COMSOL FEMLAB) исследована модель сепаратора. Получены графики напряженности и градиента напряженности в сепарационном канале (рис. 2, 3).

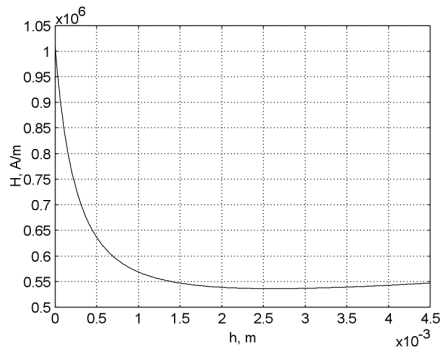


Рисунок 2 – График распределения напряженности поля

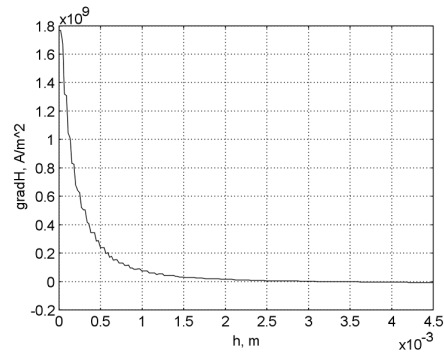


Рисунок 3 – График распределения градиента напряженности поля

На магнитную частицу в сепараторе действуют две взаимно перпендикулярные силы: гидродинамическая сила ( $F_d$ ) и магнитная ( $F_m$ ) [7, 8] (рис. 4):

$$F_d = 6\pi\eta r v_0; \quad (1)$$

$$F_m = \mu_0 V M \text{grad} H, \quad (2)$$

где  $\eta$  – динамическая вязкость магнитной жидкости (120 мПа·с);  $r$  – радиус магнитного липида (7 нм – диаметр наночастиц магнетита 10 нм плюс липидный слой 2 нм);  $v_0$  – скорость потока;  $\mu_0$  – магнитная проницаемость вакуума;  $V$  – объем наночастицы;  $M$  – намагниченность наночастицы (намагниченность насыщения  $3,2 \cdot 10^5$  А/м при напряженности поля от  $4,0 \cdot 10^5$  А/м);  $\text{grad}H$  – градиент напряженности.

Магнитная сила воздействует на магнитную частицу, направляя её в область максимального градиента с магнитной скоростью:

$$v_m = \frac{\mu_0 V M \text{grad} H}{6\pi\eta r} = \frac{\mu_0 r^2 M \text{grad} H}{4,5\eta}. \quad (3)$$

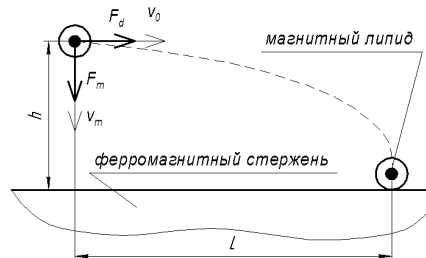


Рисунок 4 – Траектория наночастицы в липидной оболочке

В зависимости от расстояния до поверхности ферромагнитного стержня и скорости потока магнитная наночастица будет притянута и захвачена полем или смыта вместе с немагнитной фракцией.

Используя вышеуказанные зависимости и данные, полученные в результате моделирования, рассчитана магнитная сила и магнитная скорость на разном расстоянии от ферромагнитного стержня. При скорости потока, равной 0,004 м/с, и рассчитанной магнитной скорости строим траекторию липида в магнитном поле (рис. 4). Рассчитав траекторию (с учётом возрастания магнитной силы и увеличения магнитной скорости по мере приближения к стержню), определим конечное положение наночастицы ( $L$ ) в зависимости от исходного расстояния до стержня ( $h$ ). Результаты вычислений представлены в табл. 1.

Таблица 1 – Результаты расчетов магнитной силы и скорости на разном расстоянии от поверхности стержня

$h$ , мм	$\text{grad}H$ , А/м <sup>2</sup>	$F_m$ , Н	$v_m$ , м/с	$L$ , мм
0	1,75E+09	1,01E-09	6,39E-02	0,000
0,5	2,50E+08	1,44E-10	9,12E-03	0,219
1,0	9,00E+07	5,20E-11	3,28E-03	0,828
1,5	3,00E+07	1,73E-11	1,09E-03	2,655
2,0	1,00E+07	5,77E-12	3,65E-04	8,136
2,5	5,40E+06	3,12E-12	1,97E-04	18,287
3,0	1,80E+06	1,04E-12	6,57E-05	48,737
3,3	0	0	0	$\infty$

При увеличении расстояния между липидом и ферромагнитным стержнем значительно уменьшается магнитная сила и возрастает вероятность сноса магнитных частиц вместе с немагнитной фракцией. На расстоянии до 2,5 мм от поверхности стержня

будет происходить гарантированный захват магнитного липида. Основываясь на представленных расчетах, предлагаем следующую конструкцию сепаратора: в канале ( $d=0,01$  м) разместим стержни ( $d=0,001$  м), как показано на рис. 5. Тонкими ли-

ниями показаны зоны наиболее эффективного захвата частиц. Размещение цельных ферромагнитных стержней в канале может привести к его закупорке магнитными частицами. Поэтому стержни следует выполнить составными, т. е. состоящими

из немагнитной и ферромагнитной частей, длина ферромагнитной части стержня 20 мм (рис. 5). Таким образом, в любом поперечном сечении сепарационного канала будет находиться один ферромагнитный стержень.

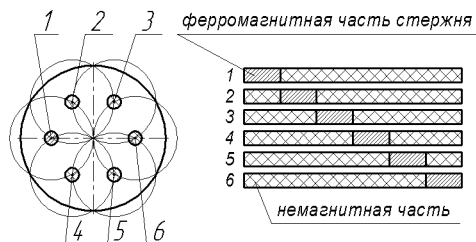


Рисунок 5 – Поперечное сечение сепарационного канала и конструкция стержней

**Выводы.** Сепарируемый продукт, проходя через сепаратор, будет попадать в высокоградиентные поля, находящиеся в разных зонах канала, что обеспечит высокую эффективность разделения и гарантированное извлечение магнитных липидов из раствора. Результативность предложенной системы необходимо проверить опытным путём.

#### ЛИТЕРАТУРА

- Jordan A. Magnetic fluid hyperthermia (MFH): Cancer treatment with AC magnetic field induced excitation of biocompatible superparamagnetic nanoparticles / Scholz R., Wust P. // *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*. – 1999. – № 201. – P. 413–419.
- Ito A. Medical application of functionalized magnetic nanoparticles / Honda H. Kobayasi T. // *J. Biosci. Bioengng.* – 2005. – № 1. – P. 1-11.
- Rosensweig R.E. *Ferrohydrodynamics* / Rosensweig R.E. - New York: Cambridge University Press, 1985. – 356 p.

- Schwalbe M. Improvement of the separation of tumour cells from peripheral blood cells using magnetic nanoparticles / Pachmann K., Hoffken K., Clement J. H. // *J. Phys.: Condens. Matter*. – 2006. – № 18. – P. 2865–2876.
- Šafarik Ivo Large-scale separation of magnetic bioaffinity adsorbents / Ptackova L., Šafarikova M. // *Biotechnology Letters*. – 2001. – № 23. – P. 1953–1956.
- Cafer T. Yavuz Low-field magnetic separation of monodisperse Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub> nanocrystals / J. T. Mayo, William W. Yu, Arjun Prakash // *Science*. – 2006. – № 314. – P. 964–967.
- Landau L.D. *Fluid Mechanics* / Lifshitz E.M. // Oxford: Pergamon Press. – 1959. – P. 66.
- Oberteuffer J.A. *Magnetic Separation: a review of principles, devices, and applications* / Oberteuffer J.A. // *IEEE Trans. Magn.* – 1974. – № 10. – P. 38–223.

Стаття надійшла 06.06.2011 р.  
Рекомендовано до друку д.т.н., проф.  
Родькіним Д.Й.

## ДОСЛІДЖЕННЯ МАГНІТОГІДРОДИНАМІЧНОГО СЕПАРАТОРА

**І. П. Кондратенко, д.т.н., проф.**

*Інститут електродинаміки Національної академії наук України*  
пр. Перемоги, 56, 03680, м. Київ, Україна  
E-mail: dep7ied@ukr.net

**А. В. Некрасов, к. т. н., доц., Є. Є. Волканін, асп.**

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

Розрахована траєкторія наночастинки в магнітному полі сепаратора. Запропонована вдосконалена конструкція сепарацийного каналу.

**Ключові слова:** магнітний сепаратор, наночастинки, ліпід.

## RESEARCH OF MAGNETOHYDRODYNAMIC SEPARATOR

**I. Kondratenko, D.Sc. (Eng.), Prof.**

*National Academy of Sciences of Ukraine Institute of Electrodynamics*  
pr. Pobedy, 56, 03680, Kyev, Ukraine  
E-mail: dep7ied@ukr.net

**A. Nekrasov, Cand.Sc. (Eng.), Assoc. Prof., E. Volkanin, post-grad.**

*Kremenchuk Mykhaylo Ostrohradskiy National University*  
ul. Pervotravnyaya, 20, 39600, Kremenchug, Ukraine  
E-mail: volkaninz@yandex.ua

In the given operation the trajectory nanoparticles in a separator magnetic field is calculated. The advanced construction separating the channel is offered.

**Key words:** magnetic separator, nanoparticles, lipid.