

## РОЗДІЛ III. ЕНЕРГЕТИКА, ЕЛЕКТРОТЕХНІКА ТА ЕЛЕКТРОМЕХАНІКА

УДК 629.735

DOI: 10.25140/2411-5363-2018-4(14)-169-177

Євген Волканін, Сергій Бойко, Олексій Городній, Оксана Борисенко, Андрій Димерець

### АВТОМАТИЗАЦІЯ ПРОЦЕСУ МАГНІТНОЇ СЕПАРАЦІЇ НАНОЧАСТИНОК

**Актуальність теми дослідження.** Актуальним науково-практичним завданням є розробка автоматизованої системи управління сепаратора, з метою точного підтримання режимних параметрів.

**Постановка проблеми.** Головна мета цієї роботи полягає в розробці методів контролю магнітних і режимних параметрів системи магнітної сепарації за фракціями наночастинок у ліпідних оболонках.

**Аналіз останніх досліджень і публікацій.** Для магнітного поділу магнітно-сприйнятливих частинок (молекул, колоїдних частинок) у потоці рідини застосовується технологія Magnetic Split-flow thin Fractionation (SPLITT) [9]. SPLITT – технологія магнітної сепарації в тонких каналах (<0,5 мм) з розсікачем потоків, орієнтованих перпендикулярно магнітному полю. Удосконалення технології поділу можливо шляхом заміни магнітної системи, традиційної для SPLITT, магнітною системою, яка використовується у ферогідростатичних сепараторах, з більшою областю однорідного градієнта в робочому проміжку.

**Виділення недосліджених частин загальної проблеми.** Виробництво нанопрепарату для цільової доставки лікарських засобів і візуалізації (діаметр магнітних наночастинок 20...80 нм) передбачає виділення із вихідного препарату наночастинок середньої фракції. Існуючі на сьогодні магнітні методи сепарації не дозволяють цього зробити. Одним із рішень є удосконалення магнітної системи Фарадея, з метою отримання великої області однорідного градієнта магнітного поля в робочому проміжку. Це дає можливість розмістити в зазначеній області сепараційний канал, конструкція якого дозволяє розділити вихідний препарат на три фракції.

Розроблена магнітна система, яка створює в робочій області високоградієнтне магнітне поле, яке впливає на траєкторії руху магнітних наночастинок, що рухаються в потоці рідини в сепараційному каналі. Також розроблена конструкція сепараційного каналу, яка дозволяє розділяти потоки рідини, які несуть наночастинок різних фракцій. Запропонована система призначена розділяти вихідний нанопрепарат на наступні фракції: дрібні наночастинок з розміром магнітного ядра 20 нм і менше (у тому числі порожні ліпідні оболонки); середні наночастинок (діаметр ядра 20...80 нм); великі наночастинок (діаметр ядра 81...100 нм). На сьогодні завдання полягає у створенні методів розрахунку автоматизованої системи, що забезпечить необхідні магнітні й режимні параметри сепараційної системи.

**Мета дослідження.** Метою цієї роботи є розробка методів моніторингу магнітних та режимних параметрів системи магнітної сепарації для фракцій наночастинок у ліпідних оболонках.

**Виклад основного матеріалу.** Для поділу наночастинок фракціями необхідно, щоб частинки різних розмірів рухалися вздовж різних траєкторій під дією магнітних та гідродинамічних сил. На траєкторію частинок впливає її розмір, магнетизація та градієнт поля. Щоб максимізувати відхилення намагнічених частинок від спрямування потоку випарного продукту, конструкція системи розділення передбачає генерацію магнітної сили, напрямком якої перпендикулярний напрямку потоку відокремленого продукту. Для забезпечення необхідних експлуатаційних параметрів процесу поділу пропонується використовувати автоматизовану систему керування з використанням нейроконтролера.

**Висновки відповідно до статті.** Розроблена система сепарації дозволяє розділяти фракції наночастинок у потоці рідини, що підтверджується чисельним моделюванням. Без застосування автоматизованої системи управління режимними параметрами процесу магнітної сепарації неможливо забезпечити поділ фракцій наночастинок, оскільки навіть незначне відхилення від розрахункових параметрів призведе до спотворення профілю швидкостей рідини. Одним із найбільш перспективних підходів реалізації автоматизованого управління є застосування нейроконтролера. Подальша робота в зазначеному напрямку буде полягати у формуванні алгоритму управління на базі нейроконтролера. Підтвердженням достовірності отриманих методів будуть результати експериментальних досліджень.

**Ключові слова:** магнітна сепарація; магнітна наночастинка в ліпідній оболонці; магнітна система Фарадея; високоградієнтне магнітне поле; нейроконтролер; автоматизована система управління.

Рис.: 7. Бібл.: 10.

**Актуальність теми дослідження.** Актуальним науково-практичним завданням є розробка автоматизованої системи управління сепаратора, з метою точного підтримання режимних параметрів.

**Постановка проблеми.** Застосування нанопрепаратів на основі магнітних наночастинок відкриває нові можливості в медицині під час діагностики й лікування багатьох онкологічних захворювань [1-4]. Крім лікування ракових захворювань, магнітні наночастинок можуть використовуватися для лікування місцевих запальних процесів з метою зниження побічних впливів [5].

Широкому застосуванню магнітних наночастинок у біомедицині перешкоджає високовартісне виробництво, складність забезпечення стабільності відтворюваних характеристик і складність отримання матеріалів з вузьким розподілом частинок за розмірами [6].

Більшість відомих на сьогодні методів дають змогу отримувати наночастинок із широким розподілом за розмірами (дисперсія більше 100 %).

Виробництво нанопрепарату для цільової доставки лікарських засобів і візуалізації (діаметр магнітних наночастинок 20...80 нм) передбачає виділення із вихідного препарату наночастинок середньої фракції. Відомі нині магнітні методи сепарації не дозволяють цього зробити. Одним із рішень є удосконалення магнітної системи Фарадея, з метою отримання великої області однорідного градієнта магнітного поля в робочому проміжку. Це дає можливість розмістити в зазначеній області сепараційний канал, конструкція якого дозволяє розділити вихідний препарат на три фракції.

У [7; 8] розроблена магнітна система, яка створює в робочій області високоградієнтне магнітне поле, яке впливає на траєкторії руху магнітних наночастинок, що рухаються в потоці рідини в сепараційному каналі. Також розроблена конструкція сепараційного каналу, яка дозволяє розділяти потоки рідини, які несуть наночастинок різних фракцій. Запропонована система призначена розділяти вихідний нанопрепарат на такі фракції: дрібні наночастинок з розміром магнітного ядра 20 нм і менше (в тому числі порожні ліпідні оболонки); середні наночастинок (діаметр ядра 20...80 нм); великі наночастинок (діаметр ядра 81...100 нм).

На сьогодні завдання полягає у створенні методів розрахунку автоматизованої системи, що забезпечить необхідні магнітні й режимні параметри сепараційної системи.

**Аналіз останніх досліджень та публікацій.** Для магнітного поділу магнітно-сприйнятливих частинок (молекул, колоїдних частинок) в потоці рідини застосовується технологія Magnetic Split-flow thin Fractionation (SPLITT) [9]. SPLITT – технологія магнітної сепарації в тонких каналах (<0,5 мм) з розсікачем потоків, орієнтованих перпендикулярно магнітному полю. Удосконалення технології поділу можливо шляхом заміни магнітної системи, традиційної для SPLITT, магнітною системою, яка використовується у ферогідростатичних сепараторах, з більшою областю однорідного градієнта в робочому проміжку.

**Визначення недосліджених частин загальної проблеми.** Таким чином, актуальним науково-практичним завданням є розробка автоматизованої системи управління сепаратора з метою точного підтримання режимних параметрів.

**Мета статті.** Головна мета цієї роботи полягає в розробці методів контролю магнітних і режимних параметрів системи магнітної сепарації за фракціями наночастинок у ліпідних оболонках.

**Виклад основного матеріалу.** Для здійснення сепарації наночастинок по фракціям необхідно, щоб частинки різного розміру рухалися за різними траєкторіями під дією магнітної і гідродинамічної сил. На траєкторію частинки впливає її розмір, намагніченість і градієнт поля. Якщо градієнт поля і його напрямок будуть однаковими в усьому об'ємі сепараційного каналу, намагнічені частинки різних фракцій будуть рухатися за різними траєкторіями (великі частинки завдяки більшому магнітному моменту будуть сильніше відхилятися під дією магнітного поля). При цьому наночастинок повинні бути намагнічені до насичення, щоб їх магнітний момент був пропорційний розміру їх магнітного ядра.

Для максимального відхилення намагнічених частинок від напрямку потоку сепарованого продукту конструкція сепараційної системи передбачає генерацію магнітної сили, напрямку якої перпендикулярний напрямку потоку сепарованого продукту.

Поперечний перетин магнітної системи і робочого проміжку представлені на рис. 1 і 2.

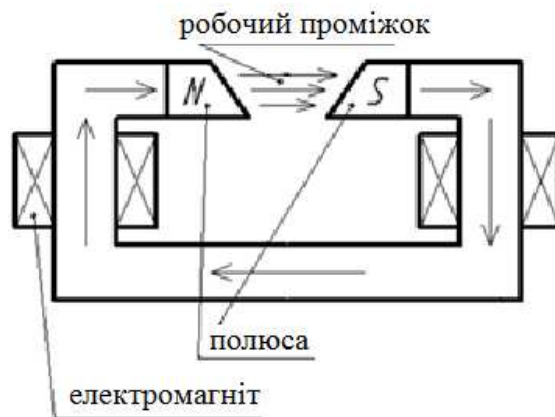


Рис. 1. Загальний вигляд магнітної системи

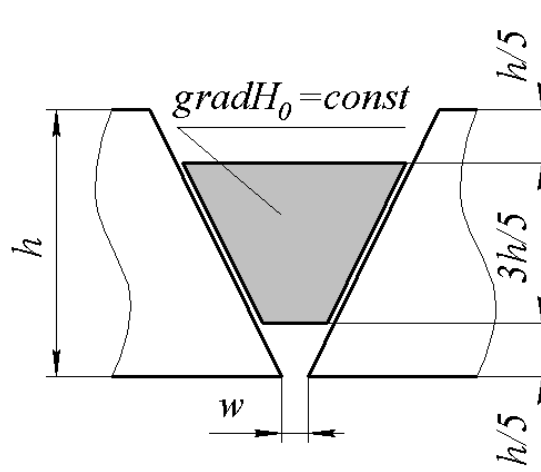


Рис. 2. Область однорідного градієнта в робочому проміжку магнітної системи

Сепараційний канал розміщений у робочому проміжку магнітної системи. Канал на вході розділений на два горизонтальних канали. Це дає можливість подавати вихідний нанопрепарат у верхню частину каналу, а в нижню подається буферна рідина (розчинник того ж хімічного складу, густини та температури, що й розчинник, який є основою нанопрепарату). На виході сепараційний канал розділений на кілька горизонтальних каналів, що дозволяє розділяти потоки рідини, які несуть наночастинки різних фракцій (рис. 3).

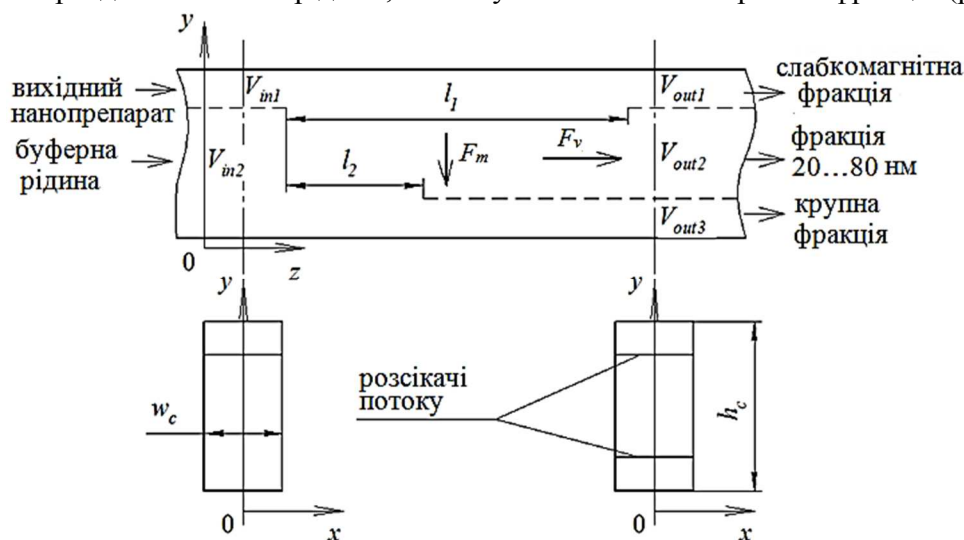


Рис. 3. Конструкція сепараційного каналу

Конструктивні параметри сепараційного каналу (рис. 4): ширина  $w_c$ , висота  $h_c$ , відстань  $l$  між розсікачами. Режимні параметри: об'ємна витрата вихідного препарату  $V_{in1}$ , об'ємна витрата буферної рідини  $V_{in2}$ , об'ємна витрата потоків розділених фракцій  $V_{out}$ .

Вихідним параметром для розробки сепаратора є об'ємна витрата вихідного нанопрепарату  $V_{in1}$ . Зазначений препарат складається із розчинника й наночастинок розміром 0...100 нм [9].

Кількість середньої (20 ... 80 нм) фракції в три рази більше, ніж дрібної (0...19 нм) і великої (81...100 нм). При цьому продуктивності вихідних потоків наступні:

$$V_{out1} = V_{out3} = V_{in1}; \quad (1)$$

$$V_{out2} = 3V_{in1} = 3V_{out1}; \quad (2)$$

$$V_{in1} + V_{in2} = V_{out1} + V_{out2} + V_{out3}. \quad (3)$$

Об'ємна витрата буферної рідини:

$$V_{in2} = 4V_{in1}. \quad (4)$$

Враховуючи продуктивність потоків, геометрію робочого проміжку й сепараційного каналу, а також товщину стінок каналу, співвідношення розмірних параметрів такі:

$$h = 10w, w_c = 2,8w, h_c = 3h/5 = 6w.$$

Наведемо продуктивність потоку через параметри каналу:

$$V_{in1} = v_0 w_c h_c / 5, \quad (5)$$

де  $v_0$  – швидкість потоку рідини в каналі, м/с.

Відстань між полюсами:

$$w = \sqrt{\frac{V_{in1}}{3,36v_0}}. \quad (6)$$

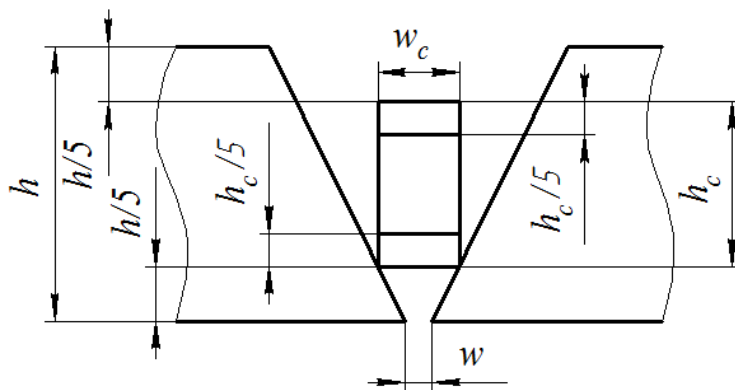


Рис. 4. Поперечний перетин робочого проміжку з розміщеним у ньому сепараційним каналом

Відстань між розсікачами потоків:

$$l_1 = \frac{3V_{out1}\pi\eta d_{21}}{w_c\mu_0 m_{p1} gradH_0}; \quad (7)$$

$$l_2 = \frac{3(V_{out1} + V_{out2})\pi\eta d_{22}}{w_c\mu_0 m_{p2} gradH_0}, \quad (8)$$

де  $d_{21}$ ,  $d_{22}$  – гідродинамічні діаметри наночастинок з діаметрами магнітного ядра 20 і 81 нм відповідно;  $m_{p1}$ ,  $m_{p2}$  – магнітні моменти наночастинок з діаметрами магнітного ядра 20 і 81 нм відповідно;  $gradH_0$  – градієнт напруженості магнітного поля в робочому проміжку, А/м<sup>2</sup>;  $\eta$  – динамічна в'язкість рідини, Па·с.

Значення  $l_2$  також є довжиною робочого проміжку магнітної системи.

З метою забезпечення необхідних режимних параметрів процесу сепарації пропонується застосувати автоматизовану систему управління з використанням нейроконтролера (рис. 5).



Рис. 5. Структурна схема автоматизованої системи управління сепаратора наночастинок із магнітною системою Фарадея з використанням нейроконтролера

Блок датчиків передає дані в нейроконтролер. У ролі датчиків використані оптичні датчики швидкості потоку, встановлені в сепараційному каналі (контролюється об'ємна витрата  $V_{in1}$  вихідного препарату, об'ємна витрата  $V_{in2}$  буферної рідини, об'ємна витрата  $V_{out}$  потоків розділених фракцій), а також датчики інтенсивності магнітного поля, розміщені в ключових точках магнітної системи. Нейроконтролер аналізує параметри, що надійшли від блоку датчиків, і направляє керуючий сигнал на блок перистальтичних насосів для корекції потоків.

Перевагою нейроконтролера в цьому випадку є те, що він може одночасно приймати сигнали від усіх датчиків вимірювального блоку й одночасно аналізувати їх у режимі реального часу, оскільки при реалізації цієї схеми звичайними контролерами, одночасно аналізувати сигнали з датчиків вимірювального блоку в режимі теперішнього часу неможливо [10].

При цьому поточний стан нейрона визначається як зважена сума його входів:

$$s = \sum_{i=1}^n x_i \cdot w_i. \quad (9)$$

Вихід нейрона є функція його стану:

$$y = f(s). \quad (10)$$

Таким чином, найбільш оптимальним методом вирішення поставленої задачі є застосування нейронних мереж.

На основі розробленої методики проектування сепаратора наночастинок із магнітною системою Фарадея виконано розрахунок параметрів магнітної системи й сепараційного каналу. За отриманими даними виконано двомірне моделювання сепараційного каналу. Результати розрахунку швидкості потоку в сепараційному каналі є вихідними даними для розрахунку гідродинамічної сили. Візуалізація швидкості потоку, отримана за допомогою моделювання методом скінчених елементів, показана на рис. 6.

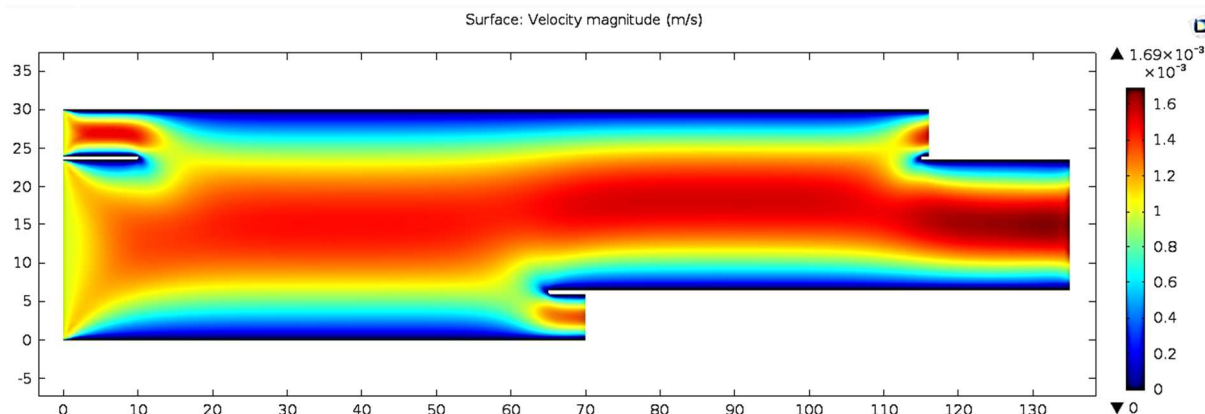


Рис. 6. Розподіл швидкості потоку в сепараційному каналі

Візуалізація траєкторій наночастинок у сепараційному каналі представлена на рис. 7.

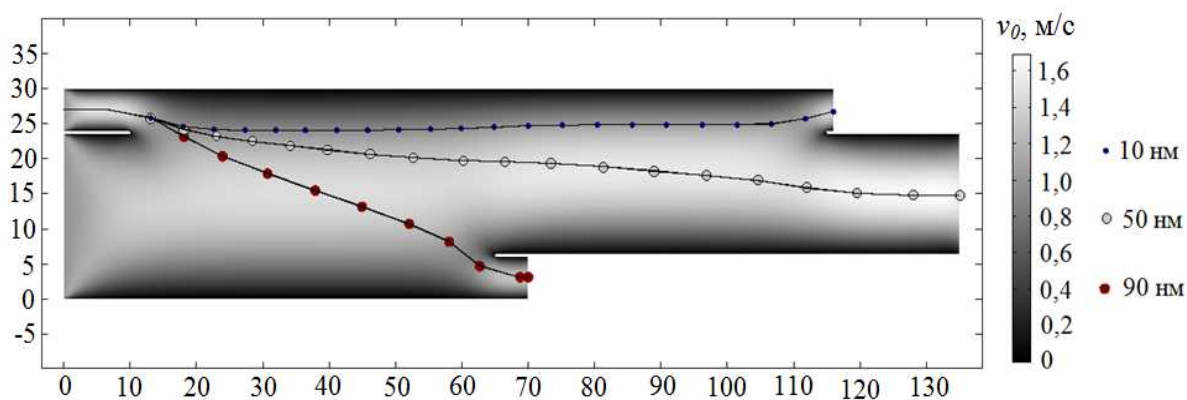


Рис. 7. Траєкторії наночастинок у сепараційному каналі

**Висновки відповідно до статті.** Розроблена система сепарації дозволяє розділяти фракції наночастинок у потоці рідини, що підтверджується чисельним моделюванням. Без застосування автоматизованої системи управління режимними параметрами процесу магнітної сепарації неможливо забезпечити поділ фракцій наночастинок, оскільки навіть незначне відхилення від розрахункових параметрів призведе до спотворення профілю швидкостей рідини. Одним із найбільш перспективних підходів реалізації автоматизованого управління є застосування нейроконтролера. Подальша робота в зазначеному напрямку буде полягати у формуванні алгоритму управління на базі нейроконтролера. Підтвердженням достовірності отриманих методів будуть результати експериментальних досліджень.

#### Список використаних джерел

1. *Анализ силового воздействия высокоградиентного магнитного поля на магнитные наночастицы в потоке жидкости* / Кириленко А. В., Чехун В. Ф., Подольцев А. Д. и др. // *Доповіді Національної академії наук України*. – 2010. – № 9. – С. 162–172.
2. Brian Dennis Plouffe (2011). *Magnetic particle based microfluidic separation of cancer cells from whole blood for applications in diagnostic medicine* (Chemical Engineering Dissertations). Northeastern University, Department of Chemical Engineering.
3. Edward P. Furlani *Magnetic Biotransport: Analysis and Applications* / P. Edward // *Materials*. – 2010. – № 3. – Pp. 2412–2446.
4. *Движение магнитных наночастиц в потоке жидкости при наложении постоянного магнитного поля* / Кириленко А. В., Чехун В. Ф., Подольцев А. Д. и др. // *Доповіді Національної академії наук України*. – 2012. – № 2. – С. 186–195.

## TECHNICAL SCIENCES AND TECHNOLOGIES

5. *Medical application of functionalized magnetic nanoparticles. Review* / Ito A., Shinkai M., Honda H. and Kobayashi, T. // *J. Bioscience Bioengineering*. – 2005. – № 1 (100). – Pp. 1–11.
6. *Магнитные наночастицы : методы получения, строение, свойства* / Губин С. П., Кокшаров Ю. А., Хомутов Г. Б., Юрков Г. Ю. // *Успехи химии*. – 2005. – № 74. – С. 539–574.
7. Волканін Є. Є. Магнітна система з постійним градієнтом для сепарації наночастинок за фракціями / Є. Є. Волканін // *Вісник НТУ «ХПІ»*. – 2013. – № 15 (988). – С. 122–130.
8. Загирняк М. В. Сепарация наночастиц по фракциям с использованием магнитной системы Фарадея / Загирняк М. В., Волканин Е. Е. // *Известия вузов. Электромеханика*. – 2014. – № 4. – С. 30–34.
9. Hweiyan Tsai. Analytical and preparative applications of magnetic split-flow thin fractionation on several ion-labeled red blood cells / Hweiyan Tsai, Ying S. Fang, Bor Fuh C. // *BioMagnetic Research and Technology*. – 2006. – № 4. – Pp. 1–7.
10. Синчук О. Н. Нейронные сети и управление процессом управления электроснабжением объектов от комбинированных электрических сетей / Синчук О. Н., Бойко С. Н. // *Технічна електродинаміка*. – 2014. – № 5. – С. 53–55.

## References

1. Kirilenko, A. V., Chekhun, V. F., Podoltcev, A. D. (2010). Analiz silovogo vozdeistviia vysokogradientnogo magnitnogo polia na magnitnye nanochastitcy v potoke zhidkosti [Analysis of the force action of a high-gradient magnetic field on magnetic nanoparticles in a liquid flow]. *Dopovidi Natsionalnoi akademii nauk Ukrainy- Statement of the National Academy of Sciences of Ukraine*, 9, 162-172 [in Russian].
2. Brian Dennis Plouffe (2011). Magnetic particle based microfluidic separation of cancer cells from whole blood for applications in diagnostic medicine (Chemical Engineering Dissertations). Northeastern University, Department of Chemical Engineering.
3. Edward, P. Furlani (2010). Magnetic Biotransport: Analysis and Applications. *Materials*, 3, 2412–2446.
4. Kirilenko, A. V., Chekhun, V. F., Podoltcev, A. D. (2012). Dvizhenie magnitnykh nanochastitc v potoke zhidkosti pri nalozhenii postoiannogo magnitnogo polia [The motion of magnetic nanoparticles in a liquid flow under the application of a constant magnetic field]. *Dopovidi Natsionalnoi akademii nauk Ukrainy- Statement of the National Academy of Sciences of Ukraine*, 2, 186-195 [in Russian].
5. Ito, A., Shinkai, M., Honda, H., and Kobayashi, T., (2005). Medical application of functionalized magnetic nanoparticles. Review. *J. Bioscience Bioengineering*, 1(100), 1–11.
6. Gubin, S. P., Koksharov, Iu. A., Khomutov, G. B., Iurkov, G. Iu. (2005). Magnitnye Uspexi khimii nanochastitcy: metody polucheniia, stroenie, svoitva [Magnetic nanoparticles: methods of obtaining, structure, properties]. *Uspekhi khimii – Advances in Chemistry*, 74, 539-574 [in Russian].
7. Volkanin, Ye. Ye. (2013). Mahnitna systema z postiinym hradiientom dlia separatsii nanochasty-nok za fraktsiiamy [Magnetic system with constant gradient for separation of nanoparticles by fractions]. *Visnyk Nacional'nogo tehnicnogo universytetu «Harkivs'kyj politehnicnyj instytut» – Bulletin of the National Technical University «Kharkiv Polytechnic Institute»*, 15 (988), 122-130 [in Ukrainian].
8. Zagirmiak, M. V. (2014). Separatsiia nanochastitc po fraktsiiam s ispolzovaniem magnitnoi sistemy Faradeia [Separation of nanoparticles by fractions using the Faraday magnetic system]. *Izvestiia vuzov. Elektromekhanika – Proceedings of high schools. Electromechanics*, 4, 30-34 [in Russian].
9. Hweiyan, Tsai, Ying, S. Fang, Bor Fuh, C. (2006). Analytical and preparative applications of magnetic split-flow thin fractionation on several ion-labeled red blood cells. *BioMagnetic Research and Technology*, 4, 1–7.
10. Sinchuk, O. N., Boiko, S. N. (2014). Neironnye seti i upravlenie protsessom upravleniia elektrosnabzheniem obektov ot kombinirovannykh elektricheskikh setei [Neural networks and management of the process of power supply control of facilities from combined electric networks]. *Tekhnichna elektrodinamika - Technical electrodyamics*, 5, 53-55 [in Russian].

UDC 629.735

Yevhen Volkanin, Serhii Boiko, Oleksiy Gorodny, Oksana Borysenko, Andrii Dymerecs

**AUTOMATIZATION OF THE NANOCHASTIC MAGNETIC SEATING PROCESS**

**Urgency of the research.** An urgent scientific and practical task is the development of an automated control system for the separator in order to accurately maintain the operating parameters.

**Target setting.** The main objective of this work is to develop methods for monitoring the magnetic and operating parameters of the magnetic separation system for fractions of nanoparticles in lipid shells.

**Actual scientific researches and issues analysis.** For magnetic separation of magnetically susceptible particles (molecules, colloidal particles) in the fluid flow, the Magnetic Split-flow thin Fragmentio-SPLITT technology is used. SPLITT is a magnetic separation technology in thin channels with a flow divider oriented perpendicular to the magnetic field. Improvement of the separation technology is possible by replacing the magnetic system, traditional for SPLITT, with a magnetic system used in ferrohydrostatic separators, with a larger area of uniform gradient in the working gap.

**Uninvestigated parts of general matters defining.** The production of a nanopreparation for targeted drug delivery and visualization (the diameter of magnetic nanoparticles is 20 ... 80 nm) implies the isolation of medium fraction nanoparticles from the initial preparation. Existing magnetic separation methods do not allow this. One solution is to improve the Faraday magnetic system in order to obtain a large area of a uniform magnetic field gradient in the working gap. This makes it possible to place in the specified area a separation channel, the design of which allows the initial preparation to be divided into three fractions.

The design of the separation channel has also been developed, which allows separating the liquid flows carrying nanoparticles of different fractions. Today, the task is to create methods for calculating an automated system that provides the required magnetic and regime parameters of a separation system.

**The research objective.** The purpose of this work is the development of methods for monitoring the magnetic and regime parameters of the magnetic separation system for fractions of nanoparticles in lipid shells.

**The statement of basic materials.** For the separation of nanoparticles by fractions, it is necessary that particles of different sizes move along different trajectories under the action of magnetic and hydrodynamic forces. The particle trajectory is influenced by its size, magnetization and field gradient. To maximize the deviation of magnetized particles from the direction of flow of the vaporized product, the design of the separation system involves the generation of magnetic force, the direction of which is perpendicular to the direction of flow of the separated product. To ensure the required operational parameters of the separation process, it is proposed to use an automated control system using a neurocontroller.

**Conclusions.** The developed separation system allows to separate the fractions of nanoparticles in the fluid flow, which is confirmed by numerical simulation. Without the use of an automated control system for operating parameters of the magnetic separation process, it is not possible to ensure the separation of nanoparticle fractions, since even a slight deviation from the calculated parameters will distort the velocity profile of the liquid. One of the most promising approaches for the implementation of automated control is the use of a neurocontroller. Further work in this direction will consist in the formation of a control algorithm based on a neurocontroller. Confirmation of the reliability of the methods obtained will be the results of experimental studies.

**Key words:** magnetic separation, magnetic nanoparticle in the lipid shell, Faraday magnetic system, high gradient magnetic field, neurocontroller, automated control system.

Fig.: 7. References: 10.

**Волканін Євген Євгенійович** – кандидат технічних наук, викладач відділення авіаційного транспорту, електроенергетики і управління, Кременчуцький льотний коледж Національного авіаційного університету (вул. Перемоги, 17/6, м. Кременчук, 39605, Україна).

**Volkanin Yevhen** – PhD in Technical Sciences, teacher of the Department of Air Transport, Electricity and Control, Kremenchuk Flight College of National Aviation University (17/6 Peremohy Str., 39605 Kremenchuk, Ukraine).

**E-mail:** science.nv.klknau@gmail.com

**ORCID:** <http://orcid.org/0000-0003-3507-1987>

**Бойко Сергій Миколайович** – кандидат технічних наук, завідувач відділення авіаційного транспорту, електроенергетики і управління, Кременчуцький льотний коледж Національного авіаційного університету (вул. Перемоги, 17/6, м. Кременчук, 39605, Україна).

**Boiko Serhii** – PhD in Technical Sciences, Head of the Department of Air Transport, Electricity and Control, Kremenchuk Flight College of National Aviation University (17/6 Peremohy Str., 39605 Kremenchuk, Ukraine).

**E-mail:** bsn1987@i.ua

**ORCID:** <http://orcid.org/0000-0001-9778-2202>

**Scopus:** ID 56417478200

**Городній Олексій Миколайович** – кандидат технічних наук, старший викладач кафедри промислової електроніки, Чернігівський національний технологічний університет (вул. Шевченка, 95, Чернігів, 14035, Україна).

**Gorodny Oleksiy** – PhD in Technical Sciences, senior lecturer of the Industrial Electronics Department, Chernihiv National University of Technology (95 Shevchenka Str., 14035 Chernihiv, Ukraine).

**E-mail:** aleksey.gorodny@gmail.com

**ORCID:** <http://orcid.org/0000-0001-5303-9564>

**Web of Science:** H-1425-2016

**Scopus:** ID 55327980200; ID 56338229500; ID 57191829796



---

**TECHNICAL SCIENCES AND TECHNOLOGIES**

**Борисенко Оксана Миколаївна** – спеціаліст I категорії, Кременчуцький льотний коледж Національного авіаційного університету (вул. Перемоги, 17/6, м. Кременчук, 39605, Україна).

**Borysenko Oksana** – specialist category I, Kremenchuk Flight College of National Aviation University (17/6 Peremohy Str., 39605 Kremenchuk, Ukraine)

**E-mail:** o.borisenko.klk@gmail.com

**ORCID:** <http://orcid.org/0000-0002-7858-1349>

**Димерець Андрій Віталійович** – студент кафедри промислової електроніки, Чернігівський національний технологічний університет (вул. Шевченка, 95, м. Чернігів, 14035, Україна).

**Dymerets Andrii** – student Department of Industrial Electronics, Chernihiv National University of Technology (95 Shevchenka Str., 14035 Chernihiv, Ukraine).

**E-mail:** andrey.dymerets@gmail.com

**ResearcherID:** U-8987-2017

**ORCID:** <http://orcid.org/0000-0002-7617-5291>