

ОБМІН ПРАКТИЧНИМ ДОСВІДОМ, ТЕХНОЛОГІЯМИ ТА ОБГОВОРЕННЯ

DOI 10.31891/2307-5732-2018-267-6(1)-266-270

УДК 65.011.56

Є.Є. ВОЛКАНІН, С.М. БОЙКО, О.Ф. КРИШАН
Кременчуцький льотний коледж Національного авіаційного університету
С.Я. ВИШНЕВСЬКИЙ, О.М. НАНАКА
Вінницький національний технічний університет

АВТОМАТИЗАЦІЯ ВИСОКОГРАДІЄНТНОЇ МАГНІТНОЇ СЕПАРАЦІЇ

Останнім часом магнітна сепарація знаходить широке застосування в таких областях науки, як молекулярна та клітинна біологія, мікробіологія, біохімія і нанотехнологія. Біологічна магнітна сепарація з використанням магнітних адсорбентів, модифікаторів і контейнерів застосовується для іммобілізації, ізоляції та видалення біологічно активних сполук і клітин [7].

У порівнянні з традиційним методом центрифугування технологія магнітної сепарації більш продуктивна, а також не вимагає складного і високовартісного обладнання. За допомогою магнітної сепарації обробляється широкий спектр речовин – від частинок відносно великих розмірів до колоїдних і наночастинок, від феромагнітних до парамагнітних і суперпарамагнітних. Крім того, магнітна сепарація – екологічно безпечна технологія.

За останні десятиліття техніка високоградієнтної магнітної сепарації (ВГМС) отримала широке поширення. До появи технології ВГМС можна було розділяти матеріали, що містять один-три сильномагнітних елемента: залізо, нікель, кобальт.

В роботі описані призначення, принципи роботи та галузі застосування високоградієнтних магнітних сепараторів. Такі сепаратори здатні розділяти слабомагнітні та парамагнітні частинки мікро і нанорозмірів. Подібні системи знаходять застосування у біомедицині, фармацевтичній галузі, онкології. Принцип відокремлення частинок полягає у захопленні більш магнітної фракції феромагнітною матрицею, розташованою в робочому проміжку магнітної системи. Матриця при намагнічуванні формує високі значення локального градієнту магнітного поля, що характеризується значною силою вилучення. Розглянута сепараційна система вимагає гнучкого і точного регулювання її режимів. Для реалізації цього пропонується застосувати штучну нейронну мережу.

Ключові слова: магнітна сепарація, магнітна частинка, високоградієнтна магнітна сепарація, високоградієнтне магнітне поле, штучна нейронна мережа, автоматизована система управління.

E.E. VOLOKANIN, S.M. BOIKO, O.F. KRYSHAN
Kremenchuk Flight College of the National Aviation University
S.YA. VYSHNEVSKIY, O.M. NANAKA
Vinnytsia National Technical University

AUTOMATION OF HIGH-GRADIENT MAGNETIC SEPARATORS

Recently, magnetic separation is widely used in such areas of science as molecular and cellular biology, microbiology, biochemistry and nanotechnology. Biological magnetic separation which use magnetic adsorbents, modifiers and containers is used to immobilize, isolate and remove biologically active compounds and cells [7]. Compared with the traditional centrifugation method, magnetic separation technology is more productive, and does not require complicated and expensive equipment. With the help of magnetic separation, a wide range of substances is processed - from particles of relatively large size to colloidal and nanoparticles, from ferromagnetic to paramagnetic and superparamagnetic. In addition, magnetic separation is an environmentally safe technology. Over the past decade, technology of high-gradient magnetic separation (HGMS) has been widespread. Before the HGMS technology appeared it could be possible to separated materials containing one to three strong-magnetic elements: iron, nickel, cobalt. The work describes the purpose, working principles and applications of high-gradient magnetic separators. Such separators are capable of separating weakly magnetic and paramagnetic particles of micro and nanosizes. Such systems are used in biomedical, pharmaceutical, oncology. The separation principle of particles is based on capturing a more magnetic fraction with a ferromagnetic matrix located in the working space of the magnetic system. The matrix under magnetization produced high values of the local gradient of the magnetic field, which characterized by considerable force of extraction. The considered separation system requires flexible and precise regulation of its modes. To implement this, it is proposed to use an artificial neural network.

Key words: magnetic separation, magnetic particle, high gradient magnetic separation, high gradient magnetic field, artificial neural network, automated control system.

Вступ

Нанотехнологія є однією з галузей знань, що найбільш динамічно розвиваються. Ця галузь оперує об'єктами, розмір яких знаходиться в діапазоні 1...100 нм, і характеризується міждисциплінарними теоретичними та практичними науковими розробками. Застосування нанопрепаратів на основі магнітних наночастинок відкриває нові можливості в медицині при діагностиці та лікуванні низки онкологічних захворювань.

Зростання наукового інтересу до магнітних наноматеріалів пов'язаний із можливістю дистанційного керування наночастинами і конструкціями на їх основі при накладанні зовнішнього магнітного поля [1].

У біомедицині магнітні наночастинки використовуються для [2]:

- біомагнітної сепарації [3];

- цільової доставки лікарських засобів [4];
- керованої локальної гіпертермії [5];
- візуалізації при діагностиці і лікуванні в онкології [6].

Рекомендований розмір наночастинок для медичного застосування становить: біомагнітна сепарація і гіпертермія – 40 ... 60 нм; цільова доставка лікарських засобів та візуалізація – 20 ... 80 нм. Для отримання фракцій з потрібним розміром частинок і видалення надлишку поверхнево-активних речовин може бути застосована магнітна сепарація, оскільки фракції значно розрізняються за магнітними властивостями.

Аналіз попередніх досліджень

Сьогодні за допомогою потужних високоградієнтних сепараторів можна сепарувати 55 слабомагнітних елементів таблиці Менделєєва, що знаходяться в незліченних кількостях сполук.

Система ВГМС [8] застосовувалася для очищення стічних вод металургійного заводу. Сепараційний камера сепаратора виконана у вигляді циліндра з розташованими всередині феромагнітними стрижнями. Камера розміщена в магнітному полі, яке генерується постійними магнітами.

Також технологія ВГМС парамагнітних мікрочастинок застосовується при обробці глини, залізних руд і промислових мінералів.

Нанорозмірний магнетит [9] (розмір ~ 10 нм) застосовувався в якості адсорбенту для очищення води. Конструктивно система ВГМС складалася із каналу, що містить феромагнітний матеріал – сталеву шерсть, яка оточена електромагнітами.

Матриця зі сталеві нержавіючої вовни також застосовується в лабораторних високоградієнтних сепараторах для очищення біологічних рідин із застосуванням нанорозмірного магнетиту [10].

У біотехнології застосовуються комерційні зразки ВГМС, призначені для сепарації клітин, помічених магнітним наномаркером (суперпарамагнітні наночастинок діаметром ~5 нм, що мають в своєму складі високоспецифічні моноклональні антитіла) [11].

Мета роботи

Мета роботи полягає в розробці методів автоматизованого контролю магнітних і режимних параметрів системи високоградієнтної магнітної сепарації. До режимних параметрам відносять швидкості потоку у відповідних точках сепараційного каналу. До магнітних параметрів, які необхідно контролювати в процесі сепарації, слід віднести значення напруженості і градієнта напруженості магнітного поля.

Матеріал і результати дослідження

Системи високоградієнтної магнітної сепарації призначені для розділення мікронних, нанорозмірних і слабомагнітних матеріалів. Високоградієнтна магнітна сепарація – це технологія вилучення магнітної фракції в рідкому середовищі за допомогою високоградієнтних магнітних полів. Високі значення градієнта досягаються спотворенням магнітного поля феромагнітною матрицею. Форма, розмір і матеріал матриці грають вирішальну роль в досягненні ефективного розподілу фракцій, крім того, не менше важливим фактором є режимні параметри, такі як швидкість потоку, напруженість магнітного поля, своєчасне розвантаження матриці від захоплених магнітним полем частинок.

Принцип дії ВГМС зводиться до захоплення дрібних частинок (магнітних, парамагнітних) феромагнітною матрицею, що розташована в сильному магнітному полі. Матриця, концентруючи вторинне поле, дозволяє досягти високих градієнтів магнітної індукції в каналі сепарації. В якості матриці застосовуються рифлені пластини, феромагнітні кульки (поліградієнтна сепарація), сталеве волокно або феромагнітні дроти (стрижні), орієнтовані певним чином в робочому обсязі. Магнітне поле створюється електромагнітною системою або системою постійних магнітів.

Високоградієнтний сепаратор складається із магнітної системи та сепараційного каналу з матрицею. Технологічний процес ВГМС (рис. 1) складається із циклів вилучення і відмивання. Перемикання режимів роботи здійснюється кранами та вимиканням магнітної системи.

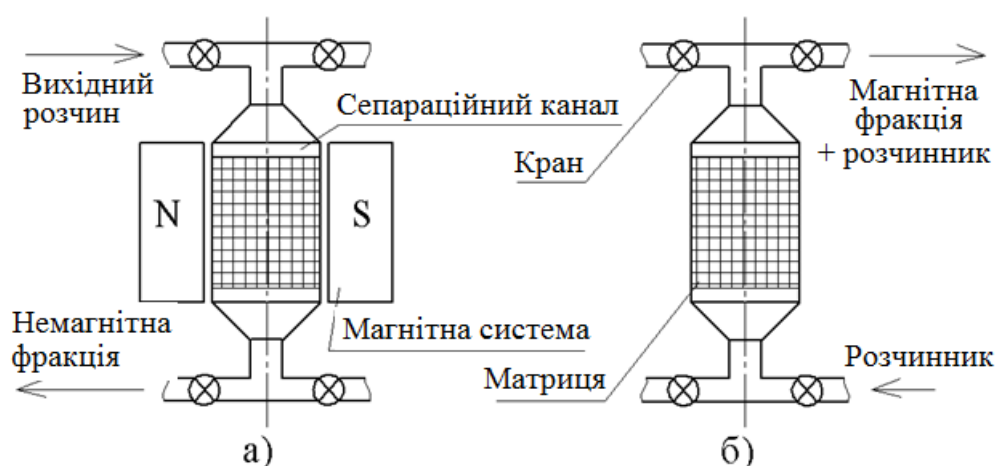


Рис. 1. Система ВГМС: а – цикл вилучення; б – цикл відмивання

Цикл вилучення: вихідний розчин прокачується насосом через сепараційний канал. Магнітні частинки під дією поля затримуються на елементах матриці, а немагнітні безперешкодно проходять сепараційний канал. Цикл відмивання: сепараційний канал звільняється від магнітної системи (або магнітне поле вимикається при застосуванні електромагнітів), а через матрицю прокачується розчинник (або вода). Отриманий розчин буде містити магнітні частинки.

Вихідними даними для проектування системи ВГМС є:

- параметри вихідного препарату (динамічна в'язкість розчинника, концентрація, розмір, намагніченість насичення та магнітна сприйнятливості магнітних частинок);
- необхідна продуктивність сепараційної системи.

Для автоматизованого управління процесом сепарації необхідно розмістити в сепараційній системі оптичні датчики швидкості потоку рідини (рис. 2, поз. 1) та магнітні датчики напруженості поля (рис. 2, поз. 2).

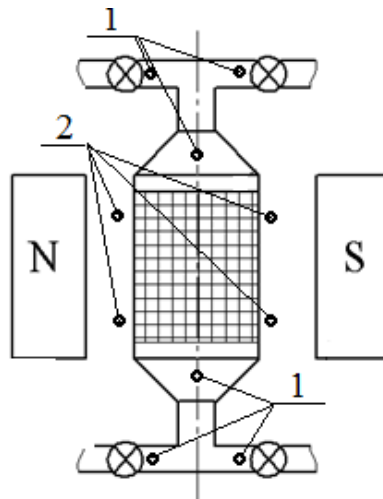


Рис. 2. Сепараційна система з датчиками

Процес сепарації полягає у підтриманні відповідного режиму шляхом регулювання продуктивності перистальтичних насосів (рис. 3, поз. 1), напруженості поля в робочому проміжку магнітної системи (рис. 3, поз. 2) та положення кранів у трубопроводах (рис. 3, поз. 3).

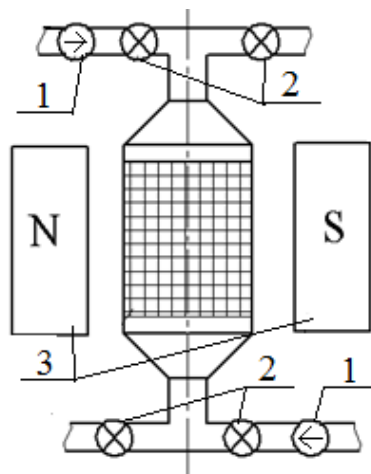


Рис. 3. Механізми керування процесом сепарації

Отримання продуктів сепарації які відповідають технічному завданню не можливе без застосування автоматизованої системи керування. Найбільш сучасні системи керування проектуються на базі штучних нейронних мереж. Сучасні інформаційні системи управління вирішують наступні задачі: класифікація образів, кластеризація, апроксимація функцій, прогнозування, оптимізація та управління. Автоматизоване управління є найскладнішою задачею, оскільки вимагає рішення ряду інших допоміжних завдань. Істотно поліпшити якість управління складними об'єктами дозволяють системи управління, що базуються на сучасних інформаційних технологіях, таких як нейронні мережі. Основна відмінність таких інтелектуальних систем – наявність механізму системної обробки даних та можливість їх отримання, зберігання і обробки.

Штучна нейронна мережа (ШНМ) це обчислювальна структура, що складається із великої кількості однотипних елементів, кожен з яких виконує відносно прості функції. Елементарним функціональним модулем ШНМ є штучний нейрон, математичну модель якого можна представити як [12]:

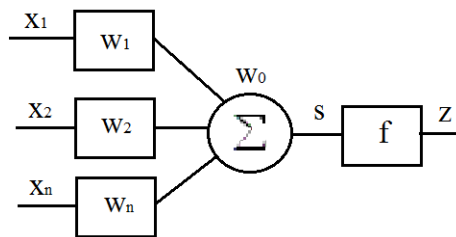


Рис. 4. Математична модель нейрона: x_i – вхідний сигнал нейрона; w_0 – зміщення; w_i – вага i -го зв'язку; f – активаційна функція нейрона; s – сигнал, одержуваний на виході суматора; z – вихідний сигнал нейрона

Сигнал на виході суматора:

$$s = \sum_{i=1}^n w_i x_i + w_0. \quad (1)$$

Тоді вихідний сигнал нейрона:

$$z = f(s). \quad (2)$$

Штучний нейрон працює наступним чином: вхідні сигнали x_i надходять на блоки, що реалізують функцію синапсів. Кожен із них характеризується своїм ваговим коефіцієнтом w_i (синаптичною вагою); зважені вхідні сигнали подаються на лінійний суматор, після чого результат їх складання надходить на блок активаційної функції; активаційна функція формує вихідний сигнал нейрона. Модель нейрона також включає в себе зміщення w_0 , яка додається до вхідного сигналу блоку активаційної функції. Активаційна функція нейрона f визначає нелінійне перетворення, здійснюване нейроном.

ШНМ складається із сукупності розташованих по шарах і пов'язаних між собою нейронів. Для системи ВГМС найбільш ефективною буде застосування тришарової штучної нейронної мережі (рис. 5).

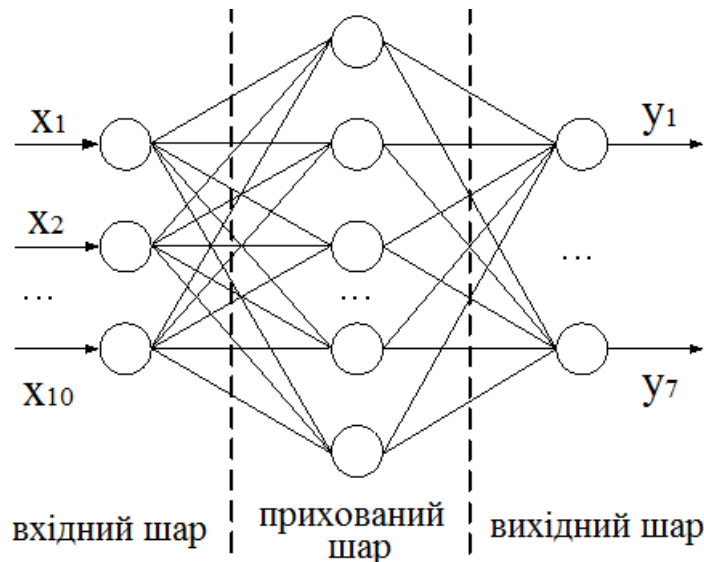


Рис. 5. Тришарова нейронна мережа керування системою ВГМС

Вхідний шар містить 10 нейронів (10 вхідних сигналів від оптичних датчиків потоку та магнітних датчиків напруженості поля), а вихідний – 7 нейронів (7 вихідних сигналів керування положеннями кранів, продуктивності перистальтичних насосів та інтенсивності магнітного поля). Нейрони вхідного шару в такій мережі просто ретранслюють вхідні сигнали (x_i) на прихований шар не перетворюючи їх. У прихованих нейронах послідовно, шар за шаром, відбувається нелінійне перетворення сигналів. Сигнали з останнього прихованого шару надходять на нейрони вихідного шару, які формують реакції мережі (y_i).

Висновок

Система ВГМС, що розглядається, автоматизована системою керування на базі нейронної мережі, призначена для ефективного розділення мікронних та нанометрових частинок в потоці рідини. Особливістю ШНМ є її здатність до навчання – процесу, при якому вільні параметри нейронної мережі адаптуються в результаті її безперервної стимуляції зовнішнім оточенням. Подальші дослідження полягатимуть у розробці типу навчання системи керування, при якому формуються зміни параметрів вхідних і вихідних сигналів.

Література

1. Pedro, Tartaj, Mar'ia del Puerto, Morales, Sabino, Veintemillas-Verdaguer, Teresita Gonz'alez-Carreno, Carlos J. Serna (2003), "The preparation of magnetic nanoparticles for applications in biomedicine", *Journal of Physics D. Applied Physics*, 36, R182–R197.
2. Волканін Є. Є. Магнітні наночастинки: методи отримання, властивості, магнітна сепарація та

використання в біомедицині / Є. Є. Волканін // Вісник Кременчуцького державного політехнічного університету імені Михайла Остроградського. – 2008. – Вип. 6/2008 (53), част. 2. – С. 49–53.

3. Moeser, G.D. Hatton, T.A., Kaitlin, A.R., William, H.G. (2004), "High-Gradient Magnetic Separation of Coated Magnetic Nanoparticles", American Institute of Chemical Engineers, vol. 50, pp. 2835–2848.

4. Ito, A., Shinkai, M., Honda, H., and Kobayashi, T., (2005), "Medical application of functionalized magnetic nanoparticles. Review", J. Bioscience Bioengineering, iss. 100, no. 1, pp. 1–11.

5. Кириленко А. В. Движение магнитных наночастиц в потоке жидкости при наложении постоянного магнитного поля / А. В. Кириленко, В. Ф. Чехун, А. Д. Подольцев // Доповіді Національної академії наук України. – 2012. – № 2. – С. 186–195.

6. Katerina Kluchova, Radek Zboril, Jiri Tucek, Michaela Pecova, [et all.] (2009), "Superparamagnetic maghemite nanoparticles from solid-state synthesis. – Their functionalization towards peroral MRI contrast agent and magnetic carrier for trypsin immobilization", Biomaterials, no. 30, pp. 2855–2863.

7. Brian Dennis Plouffe (2011), "Magnetic particle based microfluidic separation of cancer cells from whole blood for applications in diagnostic medicine", Northeastern University, Chemical Engineering Dissertations, Department of Chemical Engineering.

8. Matthias Franzreb, Uwe Habich, Gerhard Resch (2002), „Magnetic filters on duty for cleaner metallic surfaces“, Institute for Technical Chemistry, Forschungszentrum Karlsruhe GmbH Steinert Elektromagnetbau GmbH Nachrichten aus dem Institut für Technische Chemie, Geound Wassertechnologie 1, Jahrgang, Heft 3, S. 66–75.

9. Moeser, G.D. Hatton, T.A., Kaitlin, A.R., William, H.G. (2004), "High-Gradient Magnetic Separation of Coated Magnetic Nanoparticles", American Institute of Chemical Engineers, vol. 50, pp. 2835–2848.

10. Paul C. Owings (2009), High Gradient Magnetic Separation of nanoscale magnetite: a thesis : Submitted in partial fulfillment of the requirements for the degree, Kansas State University, Department of Civil Engineering, Publication Date : 2011, Graduation Month: August.

11. Синчук О. Н. Нейронные сети и управление процессом управления электроснабжением объектов от комбинированных электрических сетей / О. Н. Синчук, С. Н. Бойко // Технічна електродинаміка. – 2014. – №. 5. – С. 53–55.

12. Усков А.А. Интеллектуальные технологии управления. Искусственные нейронные сети и нечеткая логика / А.А. Усков, А.В. Кузьмин. – М. : Горячая линия – Телеком, 2004.

References

1. Pedro, Tartaj, Mar'ia del Puerto, Morales, Sabino, Veintemillas-Verdaguer, Teresita Gonz'alez-Carreno, Carlos J. Serna (2003), "The preparation of magnetite nanoparticles for applications in biomedicine", Journal of Physiss D. Applied Physiss, 36, R182–R197.

2. Volkanin Ye. Ye. Mahnitni nanochastynky: metody otrymannia, vlastyvoosti, mahnitna separatsiia ta vykorystannia v biomedysyni / Ye. Ye. Volkanin // Visnyk Kremenchutskoho derzhavnoho politekhnichnoho universytetu imeni Mykhaila Ostrohradskoho. – 2008. – Vyp. 6/2008 (53), chast. 2. – S. 49–53.

3. Moeser, G.D. Hatton, T.A., Kaitlin, A.R., William, H.G. (2004), "High-Gradient Magnetis Separation of Coated Magnetis Nanopartisles", Amerisan Institute of Chemisal Engineers, vol. 50, pp. 2835–2848.

4. Ito, A., Shinkai, M., Honda, H., and Kobayashi, T., (2005), "Medisal appllisation of funstionalized magnetis nanopartisles. Review", J. Biossiense Bioengineering, iss. 100, no. 1, pp. 1–11.

5. Kirilenko A. V. Dvijenie magnitnyih nanochastits v potoke jidkosti pri nalozhenii postoyannogo magnitnogo polya / A. V. Kirilenko, V. F. CHehun, A. D. Podoltsev // Dopovidi Natsionalnoi akademii nauk Ukraini. – 2012. – № 2. – С. 186–195.

6. Katerina Klushova, Radek Zboril, Jiri Tusek, Mishaela Pesova, [et all.] (2009), "Superparamagnetis maghemite nanopartisles from solid-state synthesis. – Their funstionalization towards peroral MRI sontrast agent and magnetis sarrier for trypsin immobilization", Biomaterials, no. 30, pp. 2855–2863.

7. Brian Dennis Plouffe (2011), "Magnetis partisle based misrofluidis separation of sanser sells from whole blood for appllisations in diagnostis medisine", Northeastern University, Chemisal Engineering Dissertations, Department of Chemisal Engineering.

8. Matthias Franzreb, Uwe Habish, Gerhard Resh (2002), „Magnetis filters on duty for sleaner metallis surfases“, Institute for Teshniscal Chemistry, Forsshungszentrum Karlsruhe GmbH Steinert Elektromagnetbau GmbH Nashrishten aus dem Institut fur Teshnisshe Chemie, Geound Wasserteshnologie 1, Jahrgang, Heft 3, S. 66–75.

9. Moeser, G.D. Hatton, T.A., Kaitlin, A.R., William, H.G. (2004), "High-Gradient Magnetis Separation of Coated Magnetis Nanopartisles", Amerisan Institute of Chemisal Engineers, vol. 50, pp. 2835–2848.

10. Paul C. Owings (2009), High Gradient Magnetis Separation of nanossale magnetite: a thesis : Submitted in partial fulfillment of the requirements for the degree, Kansas State University, Department of Civil Engineering, Publisatation Date : 2011, Graduation Month: August.

11. Sinchuk O. N. Neyronnyie seti i upravlenie protsessom upravleniya elektrosnabjeniem obyektov ot kombinirovannyih elektricheskikh setey / O. N. Sinchuk, S. N. Boyko // Tehnichna elektrodinamika. – 2014. – №. 5. – S. 53–55.

12. Uskov A.A. Intellektualnyie tehnologii upravleniya. Iskustvvennyie neyronnyie seti i nechetkaya logika / A.A. Uskov, A.V. Kuzmin. – М. : Goryachaya liniya – Telekom, 2004.

Рецензія/Peer review : 19.10.2018 р.

Надрукована/Printed :23.11.2018 р.

Рецензент: д.т.н. проф. Болюх В.Ф.